М. И. Корсунский

М. И. КОРСУНСКИЙ

АТОМНОЕ ЯДРО

ИЗДАНИЕ ПЯТОЕ,
ПЕРЕРАБОТАННОЕ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1956

13-4-1

АННОТАЦИЯ

Книга является популярным изложением вопросов ядерной физики. Рассчитана на учащихся старших классов средней школы, интересующихся вопросами физики, и преподавателей физики, на студентов естественных факультетов и технических вузов, а также на инженерно-технических работников.

В пятом издании книги сделаны многочисленные изменения и добавления, учитывающие основные достижения физики атомного ядра за период, прошедший после выхода четвёртого издания.

Моисей Израйлевич Корсунский. Атомное ядро.
Редакторы *В. А. Лешковцев и Б. Л. Лившиц.*

Техн. редактор *Н. Я. Мурашова.* Корректор *Е. А. Белицкая.*

Сдано в набор 7/VII 1956 г. Подписано к печати 13/X 1956 г. Бумага $84 \times 108^1/_{32}$. Физ. печ. л. 13,38 + 2 вклейки. Условн. печ. л. 21,35. Уч. изд. л. 21,81. Тираж 75 000 экз. Т-10029. Цена книги 6 руб. 60 коп. Заказ № 1955

Государственное издательство технико-теоретической литературы
Москва, В-71, Б. Калужская, 15

Министерство культуры СССР
Главное управление полиграфической промышленности
Первая Образцовая типография имени А. А. Жданова
Москва, Ж-54, Валовая, 28.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Глава I. **Радиоактивность** 7

Открытие Беккереля 7
О свойствах радиоактивного излучения 11
Энергия, излучаемая радием 13
Альфа-, бета- и гамма-лучи 15
Свойства альфа-, бета- и гамма-лучей 18
Что такое альфа-частица? 21
Эманация радия (радон) 25
Гипотеза радиоактивного распада 30
Спинтарископ 32
Счётчик Гейгера 34
Камера Вильсона 38
Фотографический способ регистрации альфа-частиц 41
Заряд альфа-частицы 42
Время распада радия и урана 43
Ещё об энергии, заключённой в атомах радия 50
Радиоактивные семейства 50
Изотопы 56
Некоторые итоги 58

Глава II. **Ядерная модель атома** 61

Рассеяние альфа-частиц 61
Опыты Гейгера и Марсдена 62
Статическая модель атома. 63
Ядерная модель атома 65
Связь между зарядом ядра и местом элемента в периодической системе Д. И. Менделеева 70
Измерение заряда ядра при помощи рентгеновских лучей 74

Глава III. **Масса атомных ядер** 85

Как измеряют массу атома 85
Разделение изотопов неона 87

Изотопы стабильных элементов 94
Гипотеза Проута 96
Энергия связи ядер 98
Методы разделения изотопов 105
Разделение изотопов водорода 107

Глава IV. **Расщепление атомных ядер** 111

Аномальное рассеяние альфа-частиц 112
Расщепление ядер азота 113
Расщепление других элементов 116
Опыты Блэкетта 118
Азот превращается в кислород 120
Почему не все элементы расщепляются под действием альфа-частиц 125
Открытие нейтронов 127
Методы наблюдения нейтронов 134
Ядерные превращения, приводящие к образованию нейтронов . . 137
Ядерные превращения, совершаемые нейтронами 139

Глава V. **Открытие позитрона** 142

Что такое позитрон? 142
Космические лучи 143
Опыты Скобельцына 152
Как был открыт позитрон 156
«Рождение и смерть» электронов 159

Глава VI. **Искусственное превращение атомных ядер** 165

Первая установка для искусственного расщепления атомных ядер 166
Расщепление лития 172
Экспериментальная проверка формулы Эйнштейна 174
Генератор Ван-де-Граафа 176
Ускорение переменным электрическим полем 182
Циклотрон 187
Бетатрон 193
Новые типы ускорителей заряженных частиц 204

Глава VII. **Искусственная радиоактивность** 210

Открытие искусственной радиоактивности 210
Искусственная радиоактивность, возбуждаемая нейтронами . . 216
Тепловые нейтроны 221
Захват нейтронов, не приводящий к радиоактивности 223
Изомерия атомных ядер 227
Новые химические элементы 229

Глава VIII. **Мезоны** 232

Ионизационные и радиационные потери 233
Ливни 239
Открытие мезона 243
Период жизни мезонов 246
О массе мезонов 249
Превращения ядер, вызываемые π-мезонами, и превращения самих π- и μ-мезонов 255
Тяжёлые мезоны 258
Гипероны 260
Ещё о природе космических лучей 262

Глава IX. **Нейтрино** 269

Бета-спектры 269
Гипотеза Паули 274
K-захват 277
Опыт Аллена 283

Глава X. **О строении атомных ядер и о силах, действующих между ядерными частицами** 286

Есть ли электроны в атомных ядрах? 286
Из чего состоят атомные ядра 289
О радиоактивности нейтрона 293
Ядерные силы 296
Модель ядра 300
О ядерных превращениях, сопровождающихся вылетом нескольких частиц 305

Глава XI. **Деление ядер** 309

Захват нейтронов ураном 309
Исследование природы трансуранов 311
Обнаружение редкоземельных элементов среди продуктов превращения урана 313
Деление урана 315
Химические элементы с атомным номером, бо́льшим 92 317
Ядерные осколки и их энергия 324
Вторичные нейтроны 329
Тепловые нейтроны и деление урана 333
Спонтанное деление ядер урана 235 335

Глава XII. Цепные ядерные реакции 338

Цепная реакция 338
Ядерный реактор 345
Первый советский урановый реактор 348
Атомная бомба 350

Глава XIII. О мирном применении атомной энергии 356

Атомные электростанции 356
Атомные силовые установки 363
Меченые атомы и их применение в народном хозяйстве 365

Глава XIV. Термоядерные реакции 380

Об энергии связи на одну ядерную частицу 380
Об энергии, выделяющейся при синтезе ядер 382
Термоядерные реакции 384
Водородная бомба 389
Об управляемой термоядерной реакции 392

ГЛАВА I

РАДИОАКТИВНОСТЬ

Открытие Беккереля

В 1912 г. выдающемуся английскому учёному Резерфорду удалось впервые получить убедительные доказательства реальности существования атомных ядер. Однако история наших знаний об атомных ядрах начинается с более раннего периода.

Ядерную летопись следует вести с 1896 г. Началось всё с одной научной ошибки, или, чтобы быть более точным, с неправильной научной гипотезы.

Вопрос стоял о природе загадочных тогда «*X*-лучей», открытых незадолго перед этим (1895 г.) немецким учёным Рентгеном и называемых ныне рентгеновскими лучами. Учёные всех стран находились тогда под впечатлением этого открытия. Работа Рентгена тщательно изучалась и обсуждалась. Французский учёный Анри Беккерель обратил внимание на указание Рентгена о том, что обнаруженные им невидимые глазом рентгеновские лучи выходят из конца стеклянной трубки, светящейся желтовато-зелёным светом, напоминающим свет флюоресцирующих веществ. И жёлто-зелёное свечение, и рентгеновские лучи выходили из одного и того же места стеклянной трубки. Это не было случайностью. В трубке, с которой производил свои исследования Рентген, возникновение «*X*-лучей» всегда сопровождалось желтовато-зелёным свечением стекла.

Беккерель долгое время занимался изучением различных флюоресцирующих веществ, которые под влиянием солнечного освещения начинают излучать свой собственный, характерный для них свет.

Мысль, которая послужила толчком к опытам Беккереля, была проста — не является ли флюоресценция причиной

рентгеновских лучей? Может быть, рентгеновские лучи существуют всегда, когда есть флюоресценция? Сейчас, в свете наших знаний о строении атома и природе рентгеновских лучей, эта мысль кажется нелепой, но в то время, когда природа этих лучей была неизвестна, это предположение казалось вполне естественным.

Надо сказать, что Беккерелю повезло. По счастливой случайности в качестве флюоресцирующего вещества он взял одну из солей урана — двойную сернокислую соль урана и калия. Это обстоятельство предопределило успех опыта. Сам опыт был крайне прост и состоял в следующем.

Фотографическая пластинка тщательно заворачивалась в чёрную бумагу, не прозрачную для видимых лучей. Поверх бумаги на пластинку помещалась двойная сернокислая соль урана-калия. После этого пластинка выставлялась на яркий солнечный свет. По истечении нескольких часов пластинка проявлялась с соблюдением всех необходимых предосторожностей. При этом на пластинке было обнаружено тёмное пятно, напоминающее по своей форме контуры флюоресцирующего вещества. Серией контрольных опытов Беккерель показал, что это потемнение появилось в результате действия на фотографическую пластинку лучей, исходящих из двойной сернокислой соли урана-калия и проходящих через непроницаемую для солнечного света чёрную бумагу.

Сначала Беккерель не сомневался в том, что это и есть рентгеновские лучи. Однако очень скоро он понял, что ошибся.

Случилось однажды так, что день, в который он производил свои опыты, был пасмурным, и соль урана почти не флюоресцировала. Полагая, что опыт будет неудачен, он убрал пластинку вместе с двойной сернокислой солью урана-калия в шкаф, где она и пролежала несколько дней. Перед новым опытом, не будучи уверенным в пригодности этой пластинки, он её проявил. К своему удивлению, он обнаружил на пластинке потемнение, представляющее отпечаток соли, причём интенсивность отпечатка была необыкновенно сильной. Между тем в тёмном шкафу соль не флюоресцировала. Следовательно, дело было вовсе не в флюоресценции: что-то действовало на пластинку и без неё.

Было очевидно, что Беккерель столкнулся с какими-то новыми лучами. Очень скоро удалось установить, что эти

лучи обязаны своим возникновением *урану*. Только те из флюоресцирующих веществ, в состав которых входил уран, действовали на фотографическую пластинку. На фотопластинку действовали любые соли урана. Однако сильнее всего действовал сам уран.

Лучи, открытые Беккерелем, несколько схожи с лучами Рентгена. *Они действуют на фотопластинку, проходят через чёрную бумагу и слои металла небольшой толщины.* Есть, однако, и большое различие между этими лучами. Рентгеновские лучи возникают при электрическом разряде, происходящем в сильно разрежённом газе. Давление газа должно быть порядка одной миллионной доли атмосферного давления. К электродам, между которыми происходит разряд, необходимо приложить весьма высокое напряжение,— в сотни раз превышающее напряжение в 110 вольт, которым мы пользуемся в обыденной жизни. Рентгеновские лучи возникают при этих условиях независимо от природы газа, наполняющего рентгеновскую трубку, а также независимо от вещества, из которого сделаны электроды.

Лучи Беккереля не требуют никакого электрического напряжения, ни большого ни малого. Не нужен и разрежённый газ. Рентгеновские лучи возникают только в присутствии электрического разряда; лучи Беккереля излучаются всегда, всё время, непрерывно. Но их излучает только уран. Только ли уран? Этот вопрос и был поставлен Марией Склодовской-Кюри.

Поиски Марии Кюри были длительны и невероятно трудны. Они продолжались около двух лет, в течение которых было исследовано огромное количество различных солей, минералов, рудных пород. Наконец, Кюри добилась удачи. Оказалось, что соли тория также испускают лучи Беккереля. Так же, как и в случае урана, оказалось, что интенсивность беккерелевских лучей тем больше, чем больше тория содержалось в веществе, и что чистый торий по сравнению с его соединениями отличается наибольшей интенсивностью излучения.

В поисках веществ, испускающих беккерелевские лучи, Мария Кюри не пользовалась фотографической пластинкой. Она применяла другое замечательное свойство этих лучей, обнаруженное Беккерелем.

В своих первых опытах он заметил, что под влиянием лучей, испускаемых ураном, *воздух становится проводником электричества.* Это замечательное свойство беккерелевских лучей сильно упрощает поиски веществ, которые их излучают.

Испытание вещества производится просто. Заряжают электроскоп — прибор, позволяющий измерять электрические заряды. Когда электроскоп заряжают, листочки его, прикреплённые к металлическому стержню, отталкиваются друг от друга и расходятся на некоторый угол, тем больший, чем больший заряд получает электроскоп. В таком положении листочки будут находиться до тех пор, пока на стерженьке электроскопа будет сохраняться заряд. Заряд же будет сохраняться лишь в том случае, если листочки будут хорошо изолированы от корпуса электроскопа. Воздух, как известно, является хорошим изолятором, поэтому обычно листочки, отошедшие друг от друга, довольно долго сохраняют своё положение. Стоит, однако, внести в электроскоп немного урана или его солей, как он быстро разрядится, листочки спадут и соединятся друг с другом. Так, в течение буквально двух-трёх минут можно установить, излучает ли испытуемое вещество лучи Беккереля или нет (следует отметить, что этот простой способ обнаружения веществ, излучающих лучи Беккереля, находит себе применение и поныне).

Продолжая свои поиски, Кюри натолкнулась на удивительный факт. Оказалось, что урановая смоляная обманка — руда, из которой добывают металлический уран, испускает беккерелевские лучи с гораздо большей интенсивностью, чем чистый уран. Стало ясно, что в смоляной обманке находится в виде примеси какое-то новое вещество, способное испускать лучи Беккереля с очень большой интенсивностью, ибо малая примесь этого вещества, ускользавшая от внимания химиков, излучала сильнее, чем уран, которого в руде было несравнимо больше. Долгим и упорным трудом Марии Кюри, работавшей вместе со своим мужем Пьером Кюри, удалось выделить два новых вещества — носителей беккерелевского излучения. Всем веществам, способным излучать лучи Беккереля, Мария Кюри дала общее название — *радиоактивные* (что значит — способные испускать лучи), а само явление — испускание этих лучей — получило на-

звание *радиоактивности*. В дальнейшем и сами лучи, открытые Беккерелем, стали называть *радиоактивными* лучами.

Два новых вещества, открытых Кюри, не находились в списке ранее известных (химических) элементов (уран и торий были известны задолго до открытия Беккереля). Это были новые элементы. Один из них был назван полонием (в честь Польши — родины Марии Склодовской-Кюри). Другой радиоактивный элемент, сходный по химическим свойствам с барием, назвали радием.

Открытие радия было великим делом. По своему значению его можно смело поставить в один ряд с открытием лучей Беккереля или Рентгена. Интенсивность излучения радия оказалась в миллион раз больше интенсивности излучения урана. Это количественное различие привело к чрезвычайно важным последствиям. Благодаря силе радиевого излучения удалось подметить целый ряд новых свойств радиоактивных лучей, а некоторые из них нашли себе вскоре и практическое применение.

О свойствах радиоактивного излучения

Однажды Беккерель взял у Пьера Кюри небольшое количество препарата радия, заключённого в стеклянную трубочку, с тем, чтобы продемонстрировать его свойства студентам на лекции. Трубочку с радием он положил в жилетный карман. Несколько часов он проходил с радиевым препаратом. Через несколько дней он обнаружил у себя на коже, в том месте, которое находилось против жилетного кармана, покраснение, напоминавшее по своей форме трубочку с препаратом радия. Ещё через несколько дней Беккерель почувствовал сильную боль, кожа начала трескаться, образовалась язва. Он принуждён был обратиться к врачу. Врач лечил эту рану так же, как лечат ожог. Приблизительно через два месяца рана зарубцевалась.

Пьер Кюри проделал на себе ряд опытов с целью проверки и уточнения действия лучей радия, о котором сообщил ему Беккерель. Сообщение подтвердилось. Десятичасовое облучение кожи на руке препаратом радия привело через несколько дней к таким же последствиям: краснота,

воспаление, открытая рана, на излечение которой понадобилось четыре месяца.

Опытами Кюри заинтересовался доктор Данло, который занялся систематическим изучением действия лучей радия на животных, а затем и на людей. Вскоре выяснилось, что слабые дозы лучей радия способны в некоторых случаях оказывать благотворное влияние на организм. Например, они хорошо излечивали различные кожные заболевания.

После того как результаты этих опытов стали известны, изучение медицинского и биологического действия лучей радия приняло широкий характер. Через некоторое время было замечено, что лучи радия по-разному действуют на различные клетки и ткани. Те клетки, которые быстро размножаются, особенно сильно страдают от разрушительного действия лучей радия. Это выдающееся открытие сразу определило практическую ценность лучей. Радий сделался неоценимым помощником врачей в борьбе со страшным бичом человечества — раковыми заболеваниями.

Раковая опухоль состоит из чрезвычайно быстро размножающихся клеток, поэтому лучи радия действуют на неё гораздо разрушительнее, чем на нормальные здоровые ткани. Лечение радием производится следующим образом: препарат радия, помещённый в золотой футляр, располагают возможно ближе к опухоли и в течение некоторого времени производят облучение. Если болезнь не слишком запущена и если опухоль не слишком глубоко залегает в организме, лечение идёт вполне успешно и быстро.

Другое свойство лучей радия, также получившее практическое применение, было замечено сразу же после получения первых сильных его препаратов.

Оказалось, что лучи радия, так же как и солнечные лучи, способны возбуждать флюоресценцию различных флюоресцирующих веществ. Совершенно микроскопические доли радия заставляют ярко светиться в темноте экраны из сернистого цинка, платиносинеродистого бария и других аналогичных веществ.

Примешивая к сернистому цинку ничтожные доли радия, мы получаем состав, непрерывно светящийся в темноте. Этим и воспользовались, например, для производства часов со светящимся циферблатом. Во время первой мировой войны светящимся составом обмазывались ружейные прицелы,

чтобы можно было целиться в темноте. Часто им покрывают стрелки и деления различных приборов, чтобы можно было и в темноте видеть их показания. Светящиеся составы применяются и сейчас во многих отраслях техники и в военном деле.

Энергия, излучаемая радием

Флюоресцирующие вещества излучают свет только после предварительного освещения солнечным светом. Если предохранить флюоресцирующие вещества от действия солнечных лучей, то они перестают светиться.

Когда было установлено, что и лучи радия вызывают флюоресценцию, учёные сразу же заметили, что дело здесь обстоит весьма своеобразно. Крупинка радия, примешанная, например, к сернистому цинку, заставляет его флюоресцировать непрерывно. И день, и ночь, и неделю, и месяцы и год велось наблюдение, а сернистый цинк продолжал флюоресцировать без заметного уменьшения интенсивности испускаемого им света. Получился весьма парадоксальный результат. Если флюоресценция вызывается радиоактивными лучами, то радий излучает эти лучи без видимого ослабления интенсивности *непрерывно* и неопределённо долго.

Как же это может быть? Ведь, наверное, эти лучи, как и всякие другие, обладают энергией? Выходит, что радий непрерывно излучает энергию? Ответ на этот вопрос дал Пьер Кюри.

Вскоре после получения сильных препаратов радия он заметил, что вещество, содержащее радий, всегда теплее, чем окружающие предметы. Этим обстоятельством он и решил воспользоваться для измерения энергии, выделяемой радием. Он взял калориметр — прибор, обычно применяемый для измерения тепловой энергии. Калориметр имел достаточно толстые стенки, чтобы радиоактивные лучи нацело поглощались в них и во льду, которым он был наполнен. Так как к тому времени экспериментальные данные о поглощении радиоактивных лучей различными телами были достаточно хорошо известны, такой калориметр можно было сравнительно легко рассчитать. О величине энергии, выделяемой радием, можно было судить по количеству растаявшего льда. Зная, сколько тепла требуется на расплавление

одного грамма льда (скрытая теплота плавления) и взвесив расплавившийся лёд, можно установить, сколько тепла за выбранный для исследования промежуток времени выделяет взятое количество радия. Отсюда легко рассчитать, сколько энергии выделяет один грамм радия в секунду.

Из этих измерений Кюри нашёл, что один грамм радия выделяет в час 140 малых калорий. 140 малых калорий — это небольшая энергия (напомним, что малая калория — это количество тепла, способное нагреть один грамм воды на один градус Цельсия). Таким образом, энергия, выделяемая радием, столь мала, что количество её, необходимое для нагревания одного стакана воды до кипения, выделится одним граммом радия только в течение шести суток.

Энергия, выделяемая радием в один час, невелика. Но ведь она выделяется непрерывно на протяжении очень большого промежутка времени. Следовательно, в общем радий выделяет большое количество энергии. Возникает естественный вопрос, откуда же радий черпает эту энергию?

Одним из основных законов физики является закон сохранения и превращения энергии. Этот закон установлен на основании наблюдений и исследований, охватывающих и обобщающих все известные в науке факты.

Согласно этому закону *энергия не возникает и никогда не исчезает; возможны лишь переходы энергии из одной формы в другую.*

Энергия радиоактивных веществ выделяется в виде радиоактивных лучей и притом непрерывно. Первое время никак не удавалось связать это выделение энергии с каким-либо изменением самих радиоактивных веществ. Казалось, что запас этой энергии в радиоактивных веществах безграничен.

Затруднение, возникшее в связи с излучением радия, усугублялось ещё рядом других фактов, добытых учёными.

Естественно, что когда мы желаем изучить какое-нибудь явление, то прежде всего ищем, какие силы природы влияют на это явление, что способно изменить характер его. Когда такие силы найдены, легче наметить путь, по которому надо итти, чтобы связать рассматриваемое явление с другими, ранее хорошо изученными. Однако и здесь исследователей постигла неудача. Они не смогли найти никаких средств, способных подействовать на радиоактивную

способность радия. Ни самые высокие или низкие температуры, ни самые сильные электрические и магнитные поля, ни огромные давления, ни сильнейшие химические реактивы, одним словом, ни одно из самых могущественных средств физической лаборатории не могло оказать влияния на способность радия излучать энергию.

В начале нашего столетия слово радий было у многих на устах. Загадка радиоактивности волновала всех учёных, особенно физиков, и почти все они стремились найти объяснение этим, казавшимся таинственными, фактам. Путь был один — изучать свойства радиоактивных лучей и искать следы каких-либо изменений, происходящих с радием. Но как искать?

Стремясь разгадать тайну радиоактивности, учёные шли различными путями, и результаты их огромной творческой работы не замедлили сказаться.

Альфа-, бета- и гамма-лучи

Мы уже упоминали о многочисленных попытках повлиять на способность радия испускать радиоактивные лучи. Эти попытки оказались безрезультатными. Однако, пытаясь воздействовать на радий магнитным полем, Пьер и Мария Кюри обнаружили, что хотя лучеиспускающая способность радия при помещении его в магнитное поле не меняется (интенсивность излучения остаётся неизменной), сами радиоактивные лучи претерпевают сильное изменение при прохождении через магнитное поле. Однородный до вступления в магнитное поле луч разделяется полем на два луча. Один из этих лучей распространяется так, как если бы магнитное поле на него совершенно не действовало; другой луч под влиянием поля резко изменяет направление своего движения.

Ко времени опытов Беккереля физикам уже были известны лучи, способные отклоняться в магнитном поле. Это были лучи, образованные потоком электрически заряженных частиц, движущихся в одном направлении. По направлению отклонения можно определить знак заряда, т. е. установить, является ли заряд частицы положительным или отрицательным. Более подробные сведения могли быть получены при наблюдении движения этих частиц в магнитном

и электрическом полях. Как мы увидим далее, в этом случае возможно определить не только заряд, но и его отношение к массе движущейся частицы. Из опытов Кюри вытекало, что движущиеся заряды отрицательны, а измеренное отношение заряда к массе оказалось равным $5,3 \cdot 10^{17}$ электростатических единиц на грамм. Таким же отношением заряда к массе обладают электроны, имеющие отрицательный электрический заряд. Из этого сопоставления можно было заключить, что по крайней мере часть лучей, испускаемых радием, представляет собой поток движущихся электронов.

Была измерена скорость электронов, испускаемых радием. Она оказалась весьма большой. Некоторые из электронов имели скорость, близкую к скорости света, т. е. около 300 000 *км* в секунду.

Эти исследования немного приоткрыли таинственное покрывало, окутывающее радиоактивные лучи. Оказалось, что радиоактивное излучение имеет сложный состав и *часть* его представляет собой поток электронов. Представление о сложном составе радиоактивного излучения подтверждалось и сложным характером его поглощения. Было установлено, что радиоактивное излучение, проходя через слои вещества различной толщины, поглощается веществом сначала очень сильно, а затем так незначительно, что оказывается способным проходить через значительные толщи вещества. Естественно было предположить, что сильно поглощаемой частью радиоактивного излучения является поток электронов, а неотклоняемая магнитом часть радиоактивного излучения и есть та его часть, которая слабо поглощается в веществе. Однако специальные опыты, поставленные Резерфордом, показали, что и не отклонённая магнитом часть радиоактивного излучения по характеру поглощения подобна всему радиоактивному излучению — вначале наблюдается весьма значительное поглощение даже в небольших слоях вещества, затем поглощение резко уменьшается.

Резерфорд решил, что и эта часть радиоактивного излучения имеет сложный состав. Повидимому, магнитное поле, применённое Пьером и Марией Кюри, было недостаточно сильным, чтобы разложить его на все составные части, и Резерфорд повторяет их опыты, но при этом он создаёт гораздо более сильное магнитное поле.

Результат опытов Резерфорда оказался поразительным. Пучок лучей, который в опытах Кюри не отклонялся магнитным полем, в свою очередь расщепился на две части. Одна из них попрежнему не отклонялась магнитным полем, а другая часть под действием сильного магнитного поля слегка отклонялась от своего первоначального направления.

Весьма интересным оказалось то, что эти лучи отклонялись в сторону, противоположную отклонению электронов. Следовательно, и эта часть радиоактивных лучей представляет собой поток заряженных частиц (ибо на движение незаряженных частиц магнитное поле не действует) и притом заряженных положительно. Опыт показал, что новые составляющие радиоактивных лучей в отношении поглощения вели себя вполне определённым образом.

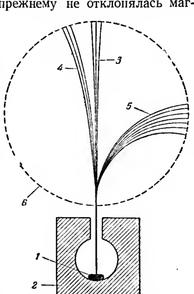


Рис. 1. Схема опыта по разделению радиоактивных лучей магнитным полем.

1 — радиоактивное вещество; *2* — свинцовая коробочка с тонким каналом, в которой помещается радиоактивное вещество; *3* — лучи, не отклонённые магнитным полем (гамма-лучи); *4* — лучи, слабо отклоняемые магнитным полем (альфа-лучи); *5* — лучи, сильно отклоняемые магнитным полем (бета-лучи); *6* — область, в которой создано магнитное поле.

Та часть радиоактивного излучения, которая совершенно не отклонялась магнитным полем, поглощалась очень незначительно. Та же часть радиоактивного излучения, которую Резерфорду впервые удалось отклонить, поглощалась чрезвычайно сильно.

Оказалось, что лучи, наблюдавшиеся вначале Беккерелем, представляют собой смесь трёх типов лучей.

На рис. 1 схематически изображено разделение радиоактивных лучей магнитным полем.

Радиоактивные лучи состоят из лучей трёх различных типов. Каждый из них получил своё особое название и обозначение. Их обозначили и назвали тремя первыми буквами греческого алфавита: альфа (α), бета (β) и гамма (γ). Альфа-лучами назвали те лучи, которые магнитным полем отклоняются слабо и представляют собой поток положительно заряженных частиц. Бета-лучами стали называть те лучи, которые сравнительно сильно отклоняются магнитным полем и представляют собой поток электронов. Гамма-лучами стали называть лучи, которые совсем не отклоняются магнитным полем.

Следует отметить, что альфа-лучи отклоняются в магнитном поле в виде узкого пучка, в то время как бета-лучи отклоняются магнитным полем в виде широкого размытого пучка. Так происходит потому, что альфа-лучи, вылетающие из радия, имеют одинаковую энергию, а бета-лучи представляют собой поток электронов различной энергии.

Свойства альфа-, бета- и гамма-лучей

Разделение радиоактивных лучей на альфа-, бета- и гамма-лучи позволило исследовать их свойства отдельно. Вот некоторые результаты этих исследований.

Поглощение. Альфа-лучи поглощаются наиболее сильно. Тонкий листок слюды или алюминия толщиной всего лишь в 0,05 *мм* поглощает альфа-лучи почти полностью. Достаточно завернуть радий в обыкновенную писчую бумагу, чтобы поглотить все альфа-лучи. Альфа-лучи сильно поглощаются воздухом. Слой воздуха толщиной всего лишь в 7 *см* поглощает альфа-лучи радия почти нацело.

Бета-лучи поглощаются веществом значительно слабее. Они в состоянии ещё в заметном количестве пройти через пластинку алюминия толщиной в несколько миллиметров.

Гамма-лучи поглощаются во много раз слабее бета-лучей. Они проходят через пластинку алюминия толщиной в несколько десятков сантиметров. Пластинка свинца толщиной в 1,3 *см* ослабляет интенсивность гамма-лучей всего лишь в два раза.

Помимо различия в степени поглощения, между альфа-, бета- и гамма-лучами существует большое различие в характере поглощения. Наиболее отчётливо оно проявляется в

изменении интенсивности этих лучей при постепенном возрастании толщины поглощающего вещества.

Бета- и гамма-лучи поглощаются постепенно. Уже самые небольшие слои вещества в некоторой мере поглощают эти лучи. Число электронов и интенсивность гамма-лучей постепенно уменьшаются с увеличением толщины фильтрующего слоя.

Альфа-лучи ведут себя совершенно иначе. При прохождении через малые слои вещества число альфа-частиц не изменяется. Уменьшается только энергия этих частиц. С возрастанием толщины поглощающего слоя энергия частиц продолжает уменьшаться, но число их сохраняется. Так будет происходить до тех пор, пока толщина поглощающего слоя не достигнет некоторой определённой величины. Фильтр такой толщины задержит сразу все альфа-частицы.

Таким образом, *каждая альфа-частица проходит в данном веществе вполне определённый путь*. Этот путь принято называть пробегом альфа-частицы. Пробег альфа-частицы зависит от её энергии и от природы вещества, в котором она движется. Установив связь между пробегом и энергией альфа-частиц, можно в дальнейшем по величине пробега определять энергию альфа-частиц. Таким методом измерения энергии альфа-частиц широко пользуются на практике.

Ионизирующее действие. Другим важным свойством радиоактивных лучей является их ионизирующее действие. Как мы уже отмечали, воздух (а также и другие газы) под действием радиоактивных лучей становится проводником электричества. В нём возникают электрически заряженные частицы — ионы. Какова же ионизирующая способность альфа-, бета- и гамма-лучей?

Наибольшее ионизирующее действие производят альфа-лучи. Альфа-лучи ионизируют воздух приблизительно в сто раз сильнее бета-лучей, выходящих из того же самого радиоактивного источника. Гамма-лучи ионизируют воздух значительно слабее, чем бета-лучи.

Между поглощением альфа-, бета- и гамма-лучей и их ионизирующей способностью существует однозначная связь. Те лучи, которые сильнее ионизируют, сильнее и поглощаются.

На ионизацию воздуха требуется энергия. Было установлено, что на образование одной пары ионов в воздухе

необходима энергия, равная 33 электрон-вольтам*). Так как альфа-частицы образуют много ионов, то при своём движении в воздухе они тратят большое количество энергии. Этим и объясняется описанное ранее свойство альфа-лучей сильно поглощаться различными веществами. Впоследствии мы расскажем, как было измерено число пар ионов, создаваемых одной альфа-частицей. Сейчас мы ограничимся только указанием этого числа. Оказалось, что одна альфа-частица создаёт в воздухе около 200 000 пар ионов. Это позволяет нам оценить энергию одной альфа-частицы. Энергия альфа-частицы оказалась приблизительно равной 6 000 000 электрон-вольт. Чтобы приобрести такую энергию, электрон должен был бы пройти электрическое поле с разностью потенциалов 6 000 000 вольт.

Биологическое действие. Радиоактивное излучение оказывает сильное воздействие на живые организмы. При большой интенсивности излучения его действие оказывается смертельным. Наиболее сильное биологическое действие производят те лучи, которые сильнее всего ионизируют. Наиболее сильно действующими оказываются альфа-лучи; бета-лучи, а тем более гамма-лучи, действуют значительно слабее. Тем не менее наиболее опасными оказываются бета- и особенно гамма-лучи. Дело в том, что альфа-лучи поглощаются очень сильно. Любая одежда является совершенно достаточной защитой от них. Бета-лучи действуют сильнее гамма-лучей, но их проникающая способность также сравнительно невелика. Толстая плотная ткань задерживает значительную часть бета-лучей. Гамма-лучи поглощаются веществом сравнительно слабо, поэтому защита от их действия является наиболее сложной. Если же количество лучей, проникших в организм, или, как говорят, доза облучения невелика, то действие лучей не представляет опасности.

Принято дозу излучения измерять в особых единицах — *рентгенах***).

*) В ядерной физике употребляется единица энергии, которую принято называть электрон-вольтом. Один электрон-вольт — это энергия, которую приобретает электрон, проходящий в электрическом поле разность потенциалов в 1 вольт. Один электрон-вольт — очень малая единица энергии, равная всего лишь $1{,}6 \cdot 10^{-19}$ джоуля.

**) Рентген — это такая доза облучения, при которой в 1 *см*^{3} воздуха при нормальных условиях образуется 2 миллиарда пар ионов.

Человек способен неограниченно долго выдерживать облучение, не превышающее 0,2 рентгена в неделю. Следует иметь в виду, что биологическое действие гамма-лучей на живой организм обладает способностью накапливаться. Поэтому результат такого воздействия зависит не от интенсивности источника облучения, а от полученной при облучении дозы. Дозы в 500—600 рентген, полученные за сравнительно короткий промежуток времени, оказываются обычно смертельными.

Что такое альфа-частица?

Как мы уже отметили выше, альфа-лучи представляют собой поток положительно заряженных частиц. Что же это за частицы? Для решения этого вопроса Резерфорд пропускал альфа-лучи через электрическое и магнитное поля и изучал отклонения от первоначального направления, претерпеваемые альфа-лучами.

Из отклонения альфа-частиц в магнитном поле он уже знал, что они несут положительный заряд, но кроме заряда надо было определить ещё и массу альфа-частиц. Выше мы уже ссылались на опыты по измерению заряда электрона. В будущем нам придётся ещё раз встретиться с аналогичными опытами, поэтому мы разберём их немного подробнее.

Пусть заряженная частица движется в электрическом поле так, что сила, действующая на неё, перпендикулярна к направлению её движения. Такая частица движется так же, как камень, брошенный параллельно поверхности земли. Под действием силы тяжести камень смещается по вертикали, причём хорошо известно из механики, что это смещение s равно

$$s = \frac{gt^2}{2},$$

где g — ускорение силы тяжести, а t — время движения. Но ускорение, которое сообщает электрическое поле частице с зарядом e, пропорционально величине заряда e и обратно пропорционально массе частицы m, т. е.

$$g_E = \frac{eE}{m},$$

где g_E — ускорение частицы в электрическом поле, а E — напряжённость электрического поля.

Если путь в электрическом поле равен l, а скорость частицы u, то время t, в течение которого она пройдёт электрическое поле, равно

$$t = \frac{l}{u}.$$

Подставив полученные значения g_E и t в выражение для s, найдём, что, пробегая определённый путь l в электрическом поле, частица испытает смещение s_E:

$$s_E = \frac{1}{2} \frac{eE}{m} \left(\frac{l}{u} \right)^2. \quad (1)$$

Таким образом, оказывается, что смещение заряженной частицы в электрическом поле зависит как от известных нам величин — длины пути l и напряжённости электрического поля E, так и от неизвестных нам скорости движения частицы u и отношения величины её заряда e к массе m. Так как, однако, мы не знаем скорости движения альфа-частицы, то даже в том случае, если бы мы измерили отклонение этих частиц в электрическом поле, мы не смогли бы определить отношение $\frac{e}{m}$, но определили бы только величину произведения $\frac{e}{m} \cdot \frac{1}{u^2}$. Если же заряженная частица будет двигаться не только в электрическом, но и в магнитном поле, то она будет испытывать два смещения: одно от действия электрической силы, а другое — от магнитной. Магнитная сила, действующая на частицу, зависит не только от величины заряда и напряжённости магнитного поля, но и от скорости частицы. Ускорение в магнитном поле g_H равно

$$g_H = \frac{eHu}{m},$$

где H обозначает напряжённость магнитного поля, а остальные буквы — те же величины, что и выше.

Смещение, испытываемое частицей по прохождении небольшого пути l в магнитном поле H, равно

$$s_H = \frac{1}{2} \frac{eHu}{m} \left(\frac{l}{u} \right)^2 = \frac{1}{2} \frac{eHl^2}{mu}. \quad (2)$$

Хотя отклонение в магнитном поле также зависит от скорости частицы и отношения $\frac{e}{m}$, но эта зависимость иная, чем

в случае электрического поля. Отклонение определяется отношением $\frac{e}{mu}$, т. е. зависит не от кинетической энергии частицы, как в случае электрического поля, а от количества движения частицы mu. Из двух уравнений для s_H и s_E, каждое из которых содержит два неизвестных $\frac{e}{m}$ и u, можно определить и то и другое.

Резерфорд так и поступил. Результат его измерений оказался следующим:

$$\frac{e}{m} = 1{,}44 \cdot 10^{14} \text{ электростатических единиц на грамм,} \quad (3)$$

а наибольшая скорость u равна 19 000 *км* в секунду. Это — громадная скорость, но она всё же в 10—15 раз меньше, чем скорости электронов, образующих бета-лучи.

Напомним, что для электронов было найдено отношение заряда к массе $\frac{e}{m}$, равное $5{,}3 \cdot 10^{17}$ электростатических единиц на грамм.

Сравнение отношения $\frac{e}{m}$ для электронов со значением $\frac{e}{m}$, полученным Резерфордом для альфа-частиц, показывает, что отношение $\frac{e}{m}$ для альфа-частиц примерно в 3600 раз меньше, чем для электронов.

Так как мы не знаем заряда меньшего, чем заряд одного электрона, то из указанного выше факта следует, что масса альфа-частицы в несколько тысяч раз больше, чем у электрона; иными словами, масса альфа-частицы такого же порядка, как и масса отдельных атомов.

Измеренное ранее отношение $\frac{e}{m}$ для водородных ионов равно $2{,}89 \cdot 10^{14}$ электростатических единиц на грамм, т. е. в два раза больше, чем у альфа-частиц. Сопоставляя друг с другом все эти значения, Резерфорд сделал естественное заключение о том, что масса альфа-частицы такого же порядка, как масса атомов водорода, или близка к ним и что, следовательно, альфа-частица может быть ионом какого-нибудь известного нам вещества. Но какого?

Если бы заряд альфа-частицы равнялся одному элементарному заряду*), то масса альфа-частицы была бы в два раза больше массы атома водорода. Но таких элементов, у которых масса атома в два раза больше массы атома водорода, в то время известно не было. Конечно, могло случиться, что альфа-частицы и представляют собой ионизированные атомы какого-то неизвестного элемента, но Резерфорд предположил другое. Он предположил, что заряд альфа-частицы не равен заряду электрона, а больше его, поэтому и масса её тяжелее, чем масса атома водорода, не в два раза, а больше. Если за единицу принять заряд электрона и считать, что заряд альфа-частицы равен двум, то тогда масса её должна быть равна четырём. В этом случае альфа-частица могла бы быть дважды ионизированным, т. е. потерявшим два электрона, атомом гелия, но если бы альфа-частица несла заряд, например, в 6 единиц, то масса её должна была бы быть в двенадцать раз больше массы атома водорода. В этом случае альфа-частицу следовало бы сопоставить с шестикратно ионизированным атомом углерода.

Резерфорд и Содди выдвинули следующую гипотезу: альфа-частицы — это атомы гелия, у которых отщеплено по два электрона, вследствие чего они приобрели положительный заряд, равный двум единицам, а отношение заряда к массе сделалось у них равным $1{,}44 \cdot 10^{14}$ электростатических единиц на грамм.

Подтверждение этой гипотезы они видели в хорошо известном, но совершенно необъяснённом до того времени факте. Во всех минералах, в которых находили радиоактивные вещества, всегда содержался и гелий. Это правило не знало исключений. Казалось странным, что гелий — совершенно инертный в химическом отношении газ — всегда сопровождал радиоактивные вещества, в то время как ни в каких других минералах его не находили. Можно было смело утверждать, что если в каком-нибудь минерале обнаружили гелий, то в нём есть радиоактивные вещества.

Резерфорд и Содди дали этому факту естественное объяснение: гелий ни откуда не попадает в минералы, содержащие радиоактивные вещества; он образуется в них, ибо радиоак-

*) Одним элементарным зарядом мы называем численную величину заряда электрона.

тивные вещества испускают лучи, часть которых и представляет собой атомы гелия (дважды ионизированные). Эта гипотеза имела исключительное по своей важности значение. Со времени Лавуазье и Дальтона учёные считали, что химические элементы вечны и неизменны; они никогда не исчезают и ни откуда не возникают вновь, а также не могут переходить друг в друга. Возможны только их различные сочетания, которые и обусловливают всё разнообразие окружающего нас мира. Конечно, с точки зрения учения Лавуазье о неизменности химических элементов элементы уран, торий, а также полоний и радий, непрерывно испускающие радиоактивные лучи, вели себя весьма странным образом. Прямого противоречия взглядам Лавуазье здесь, однако, не было. Ведь никаких изменений радия, а также и других радиоактивных элементов заметить не удавалось. Однако гипотеза, выдвинутая Резерфордом и Содди, поставила под сомнение основной вывод Лавуазье и Дальтона.

В самом деле, по этой гипотезе *химический элемент гелий зарождается* (в виде радиоактивных лучей) где-то в недрах радиоактивных веществ. Конечно, чтобы утвердить столь революционное в науке воззрение, нужны были более серьёзные факты, чем те, которые имелись в распоряжении Резерфорда и Содди. Эти факты не заставили себя долго ждать.

Эманация радия (радон)

Ещё в 1900 г. Пьер и Мария Кюри заметили, что воздух, окружающий радий, сам становится радиоактивным, т. е. начинает испускать радиоактивные лучи. Однако они не дали объяснения этому странному обстоятельству, и смысл этого загадочного явления от них ускользнул. Резерфорд и Содди разгадали и эту загадку.

Их опыт был крайне прост как по идее, так и по выполнению. Они использовали в нём способность радиоактивных веществ вызывать флюоресценцию. Чтобы исследовать отдельно радиоактивные свойства воздуха, находившегося некоторое время вблизи радия, они взяли стеклянную трубку с двумя кранами, помещёнными в начале и в конце её. При помощи этих кранов можно было изолировать воздух, находящийся внутри трубки, от внешнего пространства. Внутрь трубки они положили несколько кусочков

минерала виллемита, прекрасно флюоресцирующего под действием лучей радия. Это и были все приспособления, необходимые для опыта.

Сам опыт также крайне прост. В трубочку пропускалось некоторое количество воздуха, бывшего долгое время в соприкосновении с радием, затем оба крана закрывались и трубочка уносилась в другую комнату, расположенную далеко от радия. Несмотря на то, что радия не было, виллемит ярко светился. Яркость его свечения была такой же, как и тогда, когда он находился непосредственно вблизи радия. По описанию Содди, свет, исходящий от виллемита, был настолько сильным, что при нём можно было увидеть показания стрелок часов, прочитать заголовок газеты и т. п. Стоило, однако, выпустить из трубки воздух, как свечение виллемита прекращалось. Резерфорд понял, что дело заключается в том, что из радия выходит всё время какой-то радиоактивный газ, и назвал этот газ «эманацией радия» (что в переводе на русский означает «то, что выходит из радия»). Его догадка была встречена с большим сомнением, и ему пришлось немало потрудиться, чтобы доказать свою правоту.

Чтобы доказать, что эманация радия есть обыкновенный газ, Резерфорд и Содди решили превратить его в жидкость. С этой целью они соединили трубочку, содержащую эманацию радия и кусочки виллемита, с баллоном, покрытым изнутри сернистым цинком, тоже обладающим способностью светиться под действием радиоактивных лучей (рис. 2). Между трубкой с виллемитом и сосудом с сернистым цинком помещалась U-образная трубка, которая могла быть охлаждена до 190° ниже нуля погружением в жидкий воздух. Погрузив U-образную трубку в жидкий воздух, они стали продувать через неё воздух, содержащий эманацию. Однако, сколько они ни продували, сернистый цинк в сосуде не светился. Эманация до него не доходила, потому что вся она застревала в U-образной трубке. Виллемит в трубочке светился, а сернистый цинк в колбочке не светился. Стоило, однако, вынуть U-образную трубку из жидкого воздуха и дать ей нагреться, как тот же сернистый цинк тотчас же начинал светиться. Итак, эманация радия путём охлаждения может быть ожижена, а при нагревании вновь превращена в газ. Следовательно, она есть обыкно-

венный, хотя и радиоактивный, газ, а не какое-то особое состояние, промежуточное между обычным веществом и лучами света, как это предполагали Пьер и Мария Кюри.

Очень скоро Резерфорд и Содди натолкнулись ещё на один чрезвычайно интересный факт. Задачей одного из их опытов было выяснить, что происходит с эманацией с течением времени. Опыт был прост. Они наполнили трубочку воздухом, находившимся вблизи радия, который, как мы

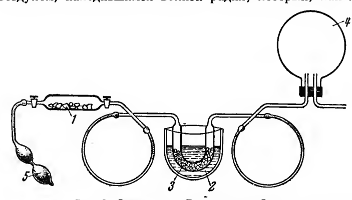


Рис. 2. Схема опыта Резерфорда и Содди.

1 — трубочка с виллемитом, наполненная эманацией радия; *2* — сосуд с жидким воздухом; *3* — U-образная трубка, в которой замораживалась эманация радия; *4* — колба со стенками, покрытыми сернистым цинком; *5* — резиновая «груша», при помощи которой воздух с эманацией продувался в колбу.

уже знаем, содержал эманацию радия, закрыли краны и стали время от времени наблюдать, что происходит. Наблюдение велось по свечению виллемита (трубка находилась в темноте). Спустя несколько дней они заметили, что интенсивность свечения виллемита падает, а к концу месяца оно совсем прекратилось.

По своим результатам этот простой опыт оказался исключительно важным, ибо это был первый случай, когда какое-либо радиоактивное вещество со временем теряло свою способность излучать радиоактивные лучи.

Опыты Резерфорда и Содди показали, что эманация радия со временем исчезает. Возникает вопрос: во что же она превращается? Ответ на него был получен в работах Рамзая и Содди.

Для изучения превращения эманации радия эти учёные решили применить спектральный анализ. Суть его заключается в том, что если через трубочку с исследуемым разреженным газом пропустить электрический ток, то газ начинает светиться, причём цвет этого свечения зависит от рода газа, наполняющего трубочку. Если проанализировать свет исследуемого газа в спектроскопе, то будет видно, что он слагается из отдельных цветных линий, соответствующих определённым простым (монохроматическим) цветам. Совокупность этих линий называют спектром.

Спектры разных газов различны. В спектре каждого газа имеются линии, характерные только для данного газа. Определив в спектроскопе, какие линии появляются, можно установить, с каким газом мы имеем дело. Вот этот метод спектрального анализа Рамзай и Содди и решили применить для анализа эманации.

С этой целью они наполнили спектроскопическую трубку (стеклянная трубочка, в которую впаяны два электрода и которая имеет сильное сужение в центральной части) воздухом, содержащим эманацию радия, запаяли её и стали наблюдать свечение газа.

Кроме известных линий, принадлежащих азоту и кислороду, т. е. газам, содержащимся в воздухе, они обнаружили неизвестные до того времени яркие линии, которые естественно было приписать эманации радия. Наблюдая ежедневно за свечением в спектроскопической трубочке, они вскоре заметили, что интенсивность свечения линий, принадлежащих эманации, постепенно уменьшается. Это вполне соответствовало опытам Резерфорда и Содди, доказавшим ранее, что эманация радия исчезает с течением времени. Однако Рамзай и Содди заметили и нечто новое. Оказалось, что по мере ослабления интенсивности линий, принадлежащих эманации, в спектре светящегося газа появляются новые линии, которые раньше не были видны. Чем больше ослабевала интенсивность линий эманации, тем ярче светились новые линии. Особенно замечательным оказалось то, что эти новые линии совпадали с хорошо известными ранее линиями газа гелия. На глазах у изумлённых исследователей эманация радия превращалась в другой газ — гелий.

Описание этих опытов вернуло нас опять к гелию. Напомним, что Резерфорд, исследуя радиоактивные лучи,

испускаемые радием, предположил, что альфа-лучи являются двукратно ионизированными атомами гелия, и когда Рамзай и Содди воочию увидели появление гелия из эманации радия, Резерфорд и Ройдс сделали завершающий опыт, окончательно показавший, что альфа-лучи есть не что иное, как атомы гелия.

Опыт заключался в следующем. Резерфорд и Ройдс поместили некоторое количество эманации в стеклянную трубочку, настолько тонкостенную, что даже сильно поглощаемые альфа-лучи могли через неё свободно проникнуть. Эту тоненькую трубочку они поместили внутрь большого сосуда, который сообщался со спектральной трубочкой. Из этого сосуда, а следовательно, и из сообщающейся с ним спектральной трубочки со всей возможной тогда тщательностью был выкачан воздух. Удаление воздуха было настолько совершенным, что, когда к спектральной трубочке прикладывали напряжение, ток через неё не шёл и никакого свечения нельзя было заметить.

Спустя двое суток, когда уже порядочное количество альфа-частиц, по предположению Резерфорда являвшихся ионами атомов гелия, могло проникнуть через тонкие стенки трубочки, содержащей эманацию радия, было снова подано напряжение к электродам спектральной трубочки. На этот раз ток через трубочку пошёл и газ в ней ярко засветился. В спектроскопе появилась яркая жёлтая линия, свойственная гелию, а ещё через несколько дней стали появляться и другие более слабые линии спектра гелия. Гипотеза Резерфорда блестяще подтвердилась. Возникновение гелия из радия и эманации радия оказалось фактом.

После опытов Резерфорда и Ройдса, а также Рамзая и Содди стало ясно, что учение Лавуазье о неизменности химических элементов не является точным: в опытах Резерфорда химический элемент гелий возникал из химического элемента радия. Кроме того, гелий возникал ещё и из эманации радия, природа которой, впрочем, была не совсем точно установлена. Не могло ли оказаться, что эманация радия тоже является химическим элементом?

Такое предположение возникло у Резерфорда и Содди. Они считали, что эманация радия, так же как и атомы гелия, возникает из радия в результате превращения его атомов. Более того, они высказали ещё более общую гипотезу.

Гипотеза радиоактивного распада

Вот сущность этой гипотезы. Атомы всех радиоактивных веществ не остаются неизменными сколь угодно долго. В результате ещё неясных нам процессов они как бы взрываются, распадаясь на части. Радиоактивные лучи — это как бы осколки, образующиеся при таком взрыве. Атомы различных веществ распадаются с разными скоростями. Одни радиоактивные вещества распадаются быстро, как, например, эманация радия, другие, наоборот, очень медленно, столь медленно, что мы не можем заметить видимые изменения в этом распаде. К таким веществам относятся и уран и радий. Ежесекундно только ничтожно малая часть атомов этих веществ разрушается. Другие взорвутся спустя несколько минут, некоторые через несколько часов, дней, месяцев, лет, веков и даже тысячелетий. У эманации почти весь распад кончается примерно через месяц-два. У других веществ этот процесс может тянуться и тысячелетия, а может быть, и миллиарды лет. При этом всё время вылетают осколки, образующие радиоактивные лучи. Но что же остаётся после вылета этих осколков? Опыт с эманацией, которая также испускает радиоактивные лучи, показывает, что эманация исчезает. Может быть, и эманация радия — тоже осколок, образующийся в процессе взрыва атома, но только более крупный, чем атом гелия?

Если мы обратимся к таблице Менделеева, помещённой в конце книги, то увидим, что между известными элементами — свинцом и висмутом, с одной стороны, и радием — с другой — должен находиться неизвестный ещё элемент, по своим свойствам напоминающий благородные газы. Не могла ли эманация быть этим элементом?

Для того чтобы произвести такое отождествление, нужно было решить задачу исключительной трудности: определить атомный вес эманации радия и её химические свойства. Необычность задачи заключалась в том, что эманации радия было очень мало. Даже будучи сосредоточена в объёме всего лишь одного кубического миллиметра, она оказывается в состоянии весьма разреженного газа, и вот с этим-то ничтожным количеством вещества предстояло проделать все химические манипуляции, да, кроме того, ещё и взвесить его. Эту задачу решил Рамзай.

Исследуя химические свойства эманации радия, он остроумно использовал её способность испускать радиоактивные лучи: по этому ориентиру эманацию радия всегда можно найти, даже если количество её невелико. Какое бы химическое превращение ни произошло с эманацией — перейдёт ли она в раствор, в осадок или она останется газом,— всюду её можно обнаружить по испусканию радиоактивных лучей. Обнаружив, к какому веществу перешла эманация, мы тем самым установим, с чем она вступает в химическое соединение. Этой идеей пользуются и в настоящее время при изучении искусственной радиоактивности.

Многочисленные попытки соединить эманацию с каким-либо веществом оказались безрезультатными. Эманация радия «нежелала» ни к чему присоединяться, совершенно так же, как и все благородные газы — гелий, неон, аргон, криптон, ксенон.

В клетку, находящуюся в таблице Менделеева в шестом периоде и в столбце благородных газов, поместили эманацию радия. Чтобы подчеркнуть, что эманация радия есть химический элемент, её стали называть новым именем «радон» по созвучию, очевидно, с названиями других благородных газов.

Для окончательного установления природы радона— эманации радия — нужно было определить его атомный вес. Решить эту задачу было неизмеримо более трудно, но Рамзай справился и с ней.

Для взвешивания эманации радия он сделал специальные микровесы, чувствительность которых превосходила всё, что до того времени было известно. Устройство весов было необычным. В них не было ни гирь, ни чашек, да и коромысло их было не похоже на коромысла обычных весов. Вместо чашек Рамзай подвесил тонкостенные, чрезвычайно лёгкие кварцевые шарики различного объёма. В один из них — меньший — вводилось ничтожное количество эманации. Другой кварцевый шарик несколько большего объёма служил противовесом. Оба шарика были подвешены к легчайшему кварцевому коромыслу. Весы устанавливались под стеклянным колпаком, внутри которого можно было менять давление воздуха. Известно, что всякое тело, находящееся в воздухе, теряет в своём весе столько, сколько весит воздух, вытесняемый этим телом. Меняя давление

воздуха под колпаком, Рамзай изменял потерю веса шариков. При повышении давления воздуха маленький шарик теряет в весе меньше, чем большой, поэтому он начинает перетягивать. При уменьшении давления воздуха под колпаком начинает перетягивать большой шарик. При разности в объёмах обоих шариков в 0,1 *см*^{3} изменение давления в один миллиметр ртутного столба даёт изменение в весе, равное приблизительно 10^{-7} *г*. Для правильного представления о чувствительности этих весов можно сказать, что мы можем измерять изменение давления не только в один миллиметр, а по крайней мере ещё в сто тысяч раз меньше.

Работая с такими весами, Рамзай и определил атомный вес эманации радия — радона. Он оказался равным 222.

После того как был установлен атомный вес радона, оказалось возможным подвергнуть гипотезу радиоактивного распада решающей проверке. Значительно раньше работ Рамзая были определены атомные веса радия и гелия. Если гелий и радон действительно образовались из радия, то сумма их атомных весов должна равняться атомному весу радия. Так и оказалось. Атомный вес радия равен 226,05, атомный вес гелия равен 4,00. Атомный вес радона должен был быть равен 222,05, что хорошо согласуется с числом 222, найденным Рамзаем. Маленькая разница в 0,05, составляющая около 0,02%, произошла потому, что он не мог измерить вес эманации с большей точностью.

Результат измерений атомного веса радона явился торжеством гипотезы радиоактивного распада. Но учёные этим не удовлетворились. Они искали всё новые факты, подтверждающие эту гипотезу. При этом они стремились поставить эксперимент так, чтобы можно было выяснить, что же происходит непосредственно с отдельными атомами, а не со всем веществом в целом. Необходимо было найти способы регистрации отдельных атомов, альфа-частиц, электронов.

Спинтарископ

Крукс первый нашёл способ наблюдать, вернее, замечать отдельные альфа-частицы. Он долгое время занимался изучением свечения, возбуждаемого альфа-частицами в различных флюоресцирующих веществах. Внимание Крукса было привлечено тем, что альфа-частицы особенно сильно воз-

буждают флюоресценцию. Виллемит светится и под действием альфа-лучей и под действием электронов, но, однако, нужно гораздо меньше радиоактивного вещества, чтобы заставить светиться виллемит, когда на него падают альфа-частицы. Не сможет ли одна альфа-частица возбудить свечение виллемита? Вот это он и решил выяснить.

Хорошо известно, что человеческий глаз обладает очень большой чувствительностью к свету. Особенно замечательно свойство глаза приспосабливаться — аккомодировать к различным интенсивностям света, в том числе и очень слабым. Может быть, рассуждал Крукс, если дать глазу возможность долго пробыть в темноте, он и увидит вспышку флюоресценции, вызванную отдельной альфа-частицей. Естественно, что для осуществления такого наблюдения надо было направить на флюоресцирующий экран не поток альфа-частиц, а по возможности отдельные частицы. Как бы медленно ни распадался радий, всё же даже крупинка его весом в один миллиграмм, занимающая объём всего лишь в $^{1}/_{20}$ кубического миллиметра, испускает в секунду около 40 000 000 альфа-частиц. Круксу же нужны были отдельные частицы. Вот как он решил эту задачу.

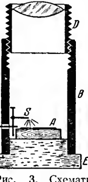


Рис. 3. Схематическое изображение спинтарископа Крукса.

На рис. 3 приведен схематический разрез «спинтарископа» — приборчика, предназначенного для наблюдения свечения, производимого отдельными альфа-частицами. На острие иголочки S помещается источник альфа-частиц — ничтожное количество радия. Чем меньше будет радия, тем лучше. Радий наносился следующим образом: концом иголки слегка дотрагивались до внутренних стенок трубки, в которой когда-то находился препарат радия. Иголка с нанесённым таким образом препаратом радия помещалась внутрь металлической трубки B, один конец которой закрывался пробкой E. На этой пробке укреплялся виллемитовый экран A. На другой конец трубки навинчивалась лупа C в оправе D. Вот и всё. Если мы посмотрим в темноте внутрь этого приборчика, то увидим

поразительное зрелище. На экране то там, то тут вспыхивают и тотчас же гаснут желтовато-зелёные вспышки. Они точно звёздочки. И вся картина похожа на звёздное небо в тёмную ночь. Она даже ещё красивее, ибо видимая в спинтарископе картина не остаётся постоянной, а быстро и непрерывно меняется.

Каждая отдельная вспышка в спинтарископе — результат удара одной альфа-частицы об экран. Таким образом, с помощью нехитрого прибора можно было наблюдать действие отдельных альфа-частиц.

Однако важно было не только видеть альфа-частицы, но и считать их. Для этого пришлось лишь немного изменить устройство спинтарископа, ибо при малом расстоянии от иглы, являющейся источником альфа-частиц, до экрана, даже при самых малых количествах радия на игле, на экране наблюдается слишком много вспышек. При больших расстояниях между источником и экраном и при ограничении поля зрения число альфа-частиц, попадающих на экран, становится столь малым (1—2 в секунду), что можно отметить каждую вспышку.

Спинтарископ дал нам возможность регистрировать отдельные альфа-частицы и позволил осуществить целый ряд изумительных по своему замыслу и исключительно важных по результатам опытов. Об этих опытах речь будет впереди. Сейчас мы остановимся на других приборах, позволяющих считать и видеть отдельные альфа-частицы.

Счётчик Гейгера

Подсчёт альфа-частиц по световым вспышкам, или, как говорят, по сцинтилляциям, оказался очень утомительным и неточным. Для того чтобы считать сцинтилляции, нужно было долгое время находиться в темноте, чтобы дать глазу возможность аккомодироваться к слабому свету. Напряжение при счёте быстро утомляет глаз, и считающий начинает ошибаться. Поэтому, как и во всяком субъективном методе, результат зависит от индивидуальных особенностей наблюдающего.

Более совершенным оказался метод, предложенный Гейгером. В основу своего метода Гейгер положил способность альфа-частиц интенсивно ионизировать воздух. Эта

ионизация может быть обнаружена, если заставить альфа-частицы проходить сквозь электрическое поле, создаваемое конденсатором. В таком случае ионы, образованные альфа-частицами, под действием электрического поля придут в движение. Положительные ионы станут двигаться в одну сторону — к отрицательно заряженной обкладке конденсатора, а отрицательные ионы — в другую — к обкладке конденсатора, заряженной положительно. Но движение зарядов представляет собой электрический ток. Следовательно, альфа-частица, ионизируя пространство внутри конденсатора, к пластинам которого подключена разность потенциалов, создаёт в цепи этого конденсатора электрический ток. Однако этот ток чрезвычайно мал, ибо хотя одна альфа-частица и создаёт относительно большое число ионов (около 200 000 пар), но заряд одного иона слишком мал (10^{-19} кулона). Легко видеть, что ток, создаваемый одной альфа-частицей, будет порядка 10^{-14} ампера и даже меньше. Такие малые токи измерять очень трудно, хотя и возможно, и в настоящее время пользуются ионизационными камерами, связанными с мощными усилителями, позволяющими измерять ионизацию, производимую одной альфа-частицей. Однако в начале нашего столетия радиотехнические приёмы усиления не были известны, поэтому непосредственное измерение ионизационного тока, производимого отдельной альфа-частицей, было невозможно.

Задача обнаружения ионизации, создаваемой одной альфа-частицей, была решена Гейгером. Он сумел увеличить ионизационный ток, вызываемый действием альфа-частицы, до такой величины, что его оказалось легко регистрировать. Гейгер воспользовался тем, что заряженные частицы, двигаясь в электрическом поле, приобретают энергию. Однако движение зарядов происходит в газе, и хотя давление его понижено, всё же движущиеся в газе электроны сталкиваются с молекулами газа и передают им часть своей энергии. Очевидно, что для того, чтобы электрон, движущийся в электрическом поле, накопил большую энергию, нужно чтобы столкновения его с молекулами газа происходили как можно реже. Для этого следует уменьшить давление газа, т. е. уменьшить количество его молекул в данном объёме. Можно подобрать давление газа таким, чтобы энергия, приобретаемая ионом на пути к электроду от одного

столкновения до другого, оказалась столь значительной, что ион смог бы за счёт своей кинетической энергии произвести ионизацию того атома, с которым он столкнётся при дальнейшем движении.

В такой ионизационной камере возникновение даже одной пары ионов приведёт к образованию большого числа новых ионов, ибо каждый движущийся ион при столкновении с атомом или молекулой создаёт новую пару ионов. Ионы, возникшие при столкновении и ускоренные электрическим полем, в свою очередь, сталкиваясь с атомами газа, ионизируют их. В результате после первого столкновения вместо двух ионов будет четыре, после второго столкновения — восемь, после третьего — шестнадцать и т. д. После десятого столкновения от каждого начального иона возникнет уже тысяча ионов, а после нескольких десятков столкновений количество ионов станет настолько большим, что образованный ими ток уже нетрудно будет обнаружить.

Такую ионизационную камеру с пониженным до нескольких десятков миллиметров ртутного столба давлением воздуха в ней и сильным электрическим полем Гейгер и предложил использовать для счёта отдельных альфа-частиц.

Камера получила название счётчика Гейгера.

Счётчик Гейгера был устроен просто. Он представлял собой небольшой цилиндр (рис. 4) диаметром 1—2 *см* и высотой 2—3 *см*, внутри которого помещалось остриё, изолированное от стенок цилиндра. Вблизи острия создавалось сильное электрическое поле, обусловленное наложением между остриём и корпусом разности потенциалов в несколько тысяч вольт; альфа-частицы впускались внутрь цилиндра через окошечко, закрытое тонкой слюдяной пластинкой. Внутри цилиндра газ разрежался до давлений в несколько десятков миллиметров ртутного столба. При этих условиях ионизация столкновением происходит очень интенсивно. Ионизационный ток быстро достигает значительной величины. Однако этот ток существует недолгое время. Вследствие наличия в цепи большого сопротивления (на рис. 4 это сопротивление отмечено цифрой *6*), на котором при большом токе падает значительное напряжение, разность потенциалов между остриём и корпусом счётчика уменьшается

настолько, что разряд в счётчике не может поддерживаться. Прекращению разряда способствует образование внутри счётчика большого объёмного заряда.

Таким образом, попавшая в счётчик альфа-частица возбуждает в нём кратковременный импульс тока. Этот импульс, однако, столь велик, что он легко может быть отмечен. В настоящее время его усиливают при помощи усилительной лампы, с которой связано реле механического нумератора, отсчитывающего возникновение в счётчике каждого импульса тока, иными словами, отсчитывающего каждое попадание альфа-частицы внутрь счётчика. В дальнейшем счётчик Гейгера был улучшен и сделан пригодным для счёта электронов и гамма-лучей.

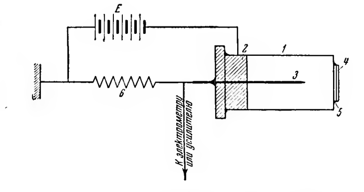


Рис. 4. Схематическое изображение счётчика Гейгера.

1 — корпус счётчика; 2 — изолятор (эбоиит или янтарь); 3 — металлическое остриё; 4 — слюдяное окошечко; 5 — вакуумное уплотнение; 6 — сопротивление, на концах которого измеряют падение напряжения в момент прохождения разряда между остриём и корпусом; E — батарея, создающая разность потенциалов между остриём и корпусом счётчика.

Мюллер предложил заменить остриё на металлическую нить, проходящую вдоль всего счётчика, благодаря чему работа счётчика стала более устойчивой. Счётчик такой конструкции называется счётчиком Гейгера-Мюллера.

Роль счётчика Гейгера-Мюллера в исследовании атомных ядер необычайно велика. Её можно сравнить с ролью аналитических весов при химическом анализе.

Камера Вильсона

Ещё более замечательным прибором оказалась камера, сконструированная Вильсоном в 1912 г. Вильсон, так же как и Гейгер, использовал свойство альфа-частиц производить ионизацию воздуха или другого газа, через который они (альфа-частицы) проходят, но использовал его совсем иначе.

Занимаясь в течение длительного времени изучением условий конденсации паров, он обнаружил, что водяной пар (а также и всякие другие пары, например, пары спирта) легко конденсируется и образует хорошо видимый туман в том случае, если воздух, в котором он находится, содержит большое количество пылинок. Конечно, конденсация паров происходит только тогда, когда соблюдены необходимые для этого физические условия, т. е. когда пары пересыщены. Пересыщение паров достигается с помощью достаточно сильного охлаждения их. Если, например, в трубе, в которой может двигаться поршень, произвести быстрое расширение газа, то вследствие резкого увеличения объёма газ охладится, и если до расширения в нём были насыщенные пары, то после расширения они окажутся пересыщенными. Начнётся образование тумана.

Однако образование тумана будет происходить только в том случае, если в воздухе есть пылинки, которые, как показал Вильсон, и являются центрами конденсации паров.

В дальнейшем им было обнаружено, что электрические заряды также могут служить центрами конденсации. Если тщательно убрать из воздуха все пылинки, но создать в нём ионы, то конденсация пара будет происходить и на ионах. Вокруг каждого иона образуется маленькая капелька жидкости. Эти хорошо известные факты он и положил в основу своего прибора, позволяющего не только считать отдельные альфа-частицы, но и видеть их путь. Идея его прибора такова.

Если в камеру, содержащую водяные пары, впустить пучок альфа-частиц, то альфа-частицы будут образовывать на своём пути ионы. Ионов, как мы знаем, будет очень много. На каждом сантиметре своего пути альфа-частицы обра-

зуют несколько десятков тысяч ионов. Если теперь резко увеличить объём воздуха в камере, то воздух охладится и, как указывалось выше, начнётся конденсация пара. На каждом ионе образуется маленькая капелька, но так как на пути следования альфа-частицы создаётся много ионов, то эти маленькие капельки, образованные вокруг ионов, сольются вместе и создадут одну сплошную линию, воспроизводящую путь, или, как принято говорить, траекторию («трэк») альфа-частицы.

В 1912 г. Вильсон построил прибор, в котором реализовал эту идею. Физики называют этот прибор камерой Вильсона.

На рис. 5 показана схема камеры Вильсона. Камера представляет собой короткую металлическую трубку K,

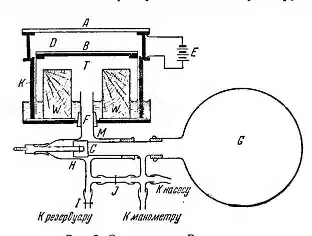


Рис. 5. Схема камеры Вильсона.

в которой может двигаться поршень B, образующий как бы дно камеры. Верхний конец трубы закрыт стеклянным диском A. Через этот диск и производится наблюдение конденсации паров внутри камеры D, наполняемой насыщенными парами воды или смесью паров воды и спирта. Если под поршнем откачать воздух, то поршень опустится, в результате чего увеличится объём камеры D. Степень опускания поршня регулируется и фиксируется с помощью специаль-

ных бортиков в трубе, в которой происходит движение поршня. Трубка F соединяет пространство под поршнем с сосудом G, в котором при помощи насосов создаётся то разрежение, то повышенное давление. Вентиль C отделяет пространство G от T.

Перед началом работы в сосуде G создаётся повышенное давление. Пространство G соединяется с T, вследствие чего поршень B поднимается в своё верхнее положение. Затем при помощи вентиля C разъединяют пространство G и T и разрежают воздух в сосуде G. После этого вентиль C открывают вновь, в результате чего давление под поршнем резко уменьшается; поршень падает, и в пространстве камеры D начинается конденсация паров. Чтобы убрать посторонние ионы, которые в обычных условиях в небольшом количестве всегда имеются в пространстве камеры, и ионы, которые остаются в нём после предыдущего наблюдения и могут помешать наблюдению, между крышкой и поршнем создают с помощью батареи аккумуляторов E электрическое поле. В момент наблюдения электрическое поле выключают. Чтобы лучше было наблюдать следы, образующиеся в камере, верхнюю часть поршня B покрывают слоем зачернённого желатина. Деревянные цилиндры W вложены в пространство под поршнем для уменьшения количества воздуха, проходящего через трубку F. Это способствует более резкому опусканию поршня.

Камера Вильсона подверглась в дальнейшем усовершенствованию, однако основные черты её сохранились. Наблюдение следов альфа-частиц в камере Вильсона производит исключительное впечатление. Пути альфа-частиц возникают перед глазами, «как живые».

Очень скоро физики научились фотографировать эти следы, и эти фотографии стали служить объективными документами, наглядно описывающими поведение альфа-частиц и отмечающими все превратности, которые они претерпевают при своём движении. На рис. Iа, Iб и II в конце книги приведены такие фотографии. На них мы видим следы, оставляемые в камере Вильсона альфа- и бета-частицами. На рис. II видны следы множества альфа-частиц, выходящих из радиоактивного препарата. Все альфа-частицы имеют одинаковый пробег в газе камеры Вильсона.

Фотографический способ регистрации альфа-частиц

Этот способ был предложен в 1910 г. При изучении фотографического действия альфа-частиц было замечено, что каждая альфа-частица производит почернение (обнаруживаемое после проявления) того зёрнышка светочувствительного слоя через которое она прошла. Это почернение отдельных зёрнышек хорошо видно под микроскопом.

Если коснуться фотографической пластинки слабым радиоактивным препаратом, то альфа-частицы, вылетающие из него, будут попадать на пластинку, вызывая почернение светочувствительного слоя. Некоторые из альфа-частиц будут лететь почти вдоль поверхности. Двигаясь в светочувствительном слое, они пройдут через множество отдельных зёрен. После проявления пластинки на ней будут отчётливо видны следы этих альфа-частиц. На рис. III в конце книги воспроизведён один из таких микрофотографических снимков. Место, где находилось остриё, покрытое радием, отчётливо видно. Ясно видны и радиальные лучи, соответствующие траекториям альфа-частиц.

Долгое время фотографический метод сравнительно мало применялся в ядерной физике. Лишь в последнее время благодаря, в частности, работам советских учёных Л. Мысовского и особенно А. Жданова, разработавших особые фотопластинки с толстыми светочувствительными слоями, фотографический метод стал входить в практику ядерных исследований, и в настоящее время является одним из основных методов ядерной физики.

Путь, который проходит частица в эмульсии фотопластинки,— небольшой, примерно в тысячу раз меньше, чем в воздухе. Пробег альфа-частиц, составляющий в воздухе несколько сантиметров, в эмульсии фотопластинки равен нескольким десяткам микрон (1 микрон $=10^{-4}$ *см*). Поэтому следы частиц в эмульсии приходится рассматривать в микроскоп.

На одной фотопластинке могут уместиться следы многих десятков и сотен тысяч частиц. Таким образом, одна фотопластинка может заменить громадное количество вильсоновских фотографий. Однако достоинством фотографического метода является не только то, что одна фотопластинка содержит много следов, хотя это обстоятельство в некоторых

случаях имеет громадное значение. Микрофотографии следов, оставляемых частицами в эмульсии фотографической пластинки, позволяют получить много сведений о рассматриваемой частице. Так, в ряде случаев в эмульсии можно наблюдать весь пробег частицы, а величина пробега частицы, как мы знаем, определяет её энергию. Кроме полного пробега, можно определить ионизирующую способность частицы. Особенно хорошо это удаётся в специальных мелкозернистых пластинках. По числу почерневших зёрен эмульсии (сосчитанных на определённой длине пробега) можно установить ионизирующую способность частицы — величину, характеризующую число пар ионов, образуемых частицей на единице длины её пути. Знание этой величины позволяет определить скорость частицы. По скорости частицы и по её пробегу, как будет показано в дальнейшем, можно определить и массу частицы.

На рис. IV—IX в конце книги приведены несколько микрофотографий со следами, оставленными в эмульсии фотопластинок различными частицами. Подробнее эти фотографии будут обсуждены в дальнейшем.

Таким образом, к 1910—1912 гг. в руках учёных оказался уже солидный арсенал различных методов изучения свойств радиоактивных лучей. Очень скоро работа учёных развернула перед нашими глазами необычайную панораму внутриатомного мира. Несколько позже мы осветим эту картину достаточно полно, а сейчас вернёмся к тому вопросу, о котором уже рассказывали, а именно, к образованию гелия из радия и радона.

Заряд альфа-частицы

Для того чтобы определить заряд отдельной альфа-частицы, нужно было узнать, сколько альфа-частиц испускает в одну секунду один грамм радия. Взяв определённое количество радия, только что химически очищенного, и измерив при помощи счётчика Гейгера число альфа-частиц, Резерфорд и Гейгер подсчитали количество альфа-частиц, испускаемых в одну секунду одним граммом радия.

По их измерениям оказалось, что один грамм радия испускает в одну секунду $3{,}7 \cdot 10^{10}$ (тридцать семь миллиардов!) альфа-частиц.

Зная, сколько альфа-частиц испускает радий, можно определить и заряд отдельной альфа-частицы. Для этого надо только измерить суммарный заряд всех альфа-частиц, испускаемых одним граммом радия или другим вполне определённым его количеством, а затем разделить этот заряд на известное уже нам число альфа-частиц.

Опыты показали, что заряд, переносимый в одну секунду альфа-частицами, испускаемыми одним граммом радия, составляет 33,2 абсолютной электростатической единицы. Поделив это число на $3{,}7\cdot 10^{10}$, находим, что заряд одной альфа-частицы равен $9\cdot 10^{-10}$ абсолютной электростатической единицы, т. е. в два раза больше, чем заряд одного электрона.

Гипотеза Резерфорда получила ещё одно подтверждение. Оказалось, что альфа-частица несёт двойной элементарный заряд. В дальнейшем было получено более точное значение величины заряда альфа-частицы. Заряд оказался равным $9{,}58\cdot 10^{-10}$ абсолютной электростатической единицы, что очень близко к удвоенному значению заряда электрона ($4{,}78\cdot 10^{-10}\cdot 2 = 9{,}56\cdot 10^{-10}$).

Время распада радия и урана

Итак, величина заряда одной альфа-частицы определена. Измерено также и число альфа-частиц, испускаемых одним граммом радия в одну секунду. Это последнее позволяет сделать ряд дальнейших весьма важных выводов. Однако прежде чем перейти к ним, остановимся на одном замечательном факте.

Мы уже отмечали, что активность некоторых радиоактивных веществ, например эманации радия, уменьшается сравнительно быстро. Об этой потере активности можно, в частности, судить по уменьшению числа альфа-частиц, испускаемых эманацией радия в единицу времени.

Возникло естественное стремление найти количественный закон, выражающий эту потерю радиоактивности. Было установлено тщательное наблюдение за изменением числа альфа-частиц, испускаемых эманацией. Оказалось (рис. 6), что количество альфа-частиц, испускаемых данным количеством эманации, уменьшается со временем

по следующему закону:

$$N = N_0 e^{-\lambda t}. \qquad (4)$$

Здесь N_0 означает число альфа-частиц, испускаемых эманацией в единицу времени в самом начале наблюдения, а N — число альфа-частиц, испускаемых в единицу времени по прошествии t секунд; e — основание натуральных логарифмов, λ — величина, показывающая, какая доля атомов распадается за одну секунду.

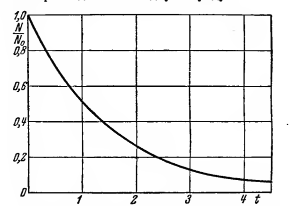


Рис. 6. Кривая радиоактивного распада (зависимость количества радиоактивного вещества N, отнесённого к начальному количеству вещества N_0, от времени t).

Самым замечательным оказалось то, что во всех случаях, когда имели дело с эманацией, коэффициент λ был одним и тем же: $2{,}1 \cdot 10^{-6}$сек.$^{-1}$. Малое ли, большое ли количество эманации было взято, λ не изменялось. По этой причине условились называть величину λ постоянной распада.

Найденная зависимость изменения интенсивности излучения со временем покажется нам особенно примечательной, если мы вспомним свойства экспоненциальной зависимости [$e^{-\lambda t}$ в формуле (4)]. Формула (4) показывает, что за одинаковый промежуток времени интенсивность падает в одно и то же число раз. Какое бы количество радиоактивного вещества мы ни взяли, за одно и то же время t распа-

дается определённая его часть $\left(\frac{N}{N_0}\right)$, равная $e^{-\lambda t}$. Будем ли мы производить измерение в начале распада (со свежеприготовленной порцией вещества) или спустя некоторый промежуток времени, когда значительная часть взятого радиоактивного вещества уже распалась, мы найдём, что интенсивность излучения и в том и другом случаях изменится в одно и то же число раз за равные промежутки времени. Это значит, что по мере уменьшения радиоактивности вещества количество распадающихся в единицу времени атомов уменьшается, но вероятность распада остаётся неизменной.

Чем меньше вещества, тем медленнее оно исчезает в результате распада. Строго говоря, согласно формуле (4) распад прекращается (т. е. N делается равным нулю) только при t, равном бесконечности. Каким же образом мы можем тогда говорить о «времени распада» урана, радия и других радиоактивных веществ?

Условимся для характеристики времени распада радиоактивных веществ принимать время, в течение которого распадается половина взятого количества вещества. Это время будет всегда одним и тем же независимо от количества вещества, и, следовательно, оно является вполне определённой характеристикой быстроты радиоактивного распада. *Время, в течение которого распадается половина радиоактивного вещества, носит название «периода полураспада».*

Для нахождения λ удобно кривую, представленную на рис. 6, изображать в полулогарифмических координатах, т. е. откладывать по оси ординат не отношение N/N_0, а логарифм этого отношения, а по оси абсцисс попрежнему откладывать время t.

В этих координатах, как видно из рис. 7, кривая распада представляет прямую линию, тангенс угла наклона α которой к оси абсцисс и даёт величину λ.

Если значение λ известно, то при помощи формулы (4) нетрудно найти время T, в течение которого интенсивность излучения любого количества данного радиоактивного вещества уменьшается вдвое. Для этого в формуле (4) надо положить $N=\frac{N_0}{2}$ и вместо t написать в показателе степени T. После сокращения на N_0 мы получим

$$e^{\lambda T}=2.$$

Прологарифмировав обе части этого выражения, найдём

$$T = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,695}{\lambda}.$$

Для эманации радия, у которой, как мы уже указывали, λ равно $2,1 \cdot 10^{-6}$ сек.$^{-1}$, из этого соотношения найдём T равным 3,82 дня.

Для всех образцов эманации радия эта величина (так же, конечно, как и постоянная распада λ) оказалась одной

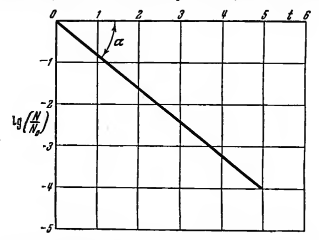


Рис. 7. Кривая радиоактивного распада в полулогарифмических координатах. Тангенс угла α равен постоянной распада.

и той же. Последующие наблюдения показали, что этот закон спадания радиоактивности наблюдается не только у эманации радия, но имеет гораздо более общий характер. Все радиоактивные вещества распадаются по такому же закону, только значения постоянной распада λ у различных радиоактивных веществ разные.

Более того, оказалось, что если изменение в числе испускаемых радиоактивным веществом частиц выражается более сложным законом, чем формула (4), то мы имеем дело со *смесью* различных радиоактивных веществ. После их отделения друг от друга всегда оказывалось, что в каждом

из них в отдельности число испускаемых частиц меняется со временем по экспоненциальному закону (4).

Из того факта, что существует ослабление интенсивности радиоактивного излучения и что интенсивность изменяется по экспоненциальному закону, следует:

1) число испускаемых альфа-частиц пропорционально количеству радиоактивного вещества;

2) уменьшение числа альфа-частиц обусловлено уменьшением количества радиоактивного вещества (радиоактивное вещество, испуская альфа-частицы, изменяет свои свойства — становится другим веществом);

3) не все атомы радиоактивного вещества испускают альфа-частицы одновременно. Только часть радиоактивного вещества испускает альфа-частицы (или другие частицы, составляющие радиоактивные лучи) в данное время. Чем больше период полураспада, тем меньше вещества распадается, скажем, в течение одной секунды.

Перейдём теперь к определению периода полураспада для радия и урана. По измерениям Резерфорда и Гейгера один грамм радия испускает в одну секунду $3{,}7 \cdot 10^{10}$ альфа-частиц, но в одном грамме радия содержится $2{,}7 \cdot 10^{21}$ атомов. Следовательно, постоянная распада радия λ_{Ra} будет равна

$$\lambda_{Ra} = \frac{3{,}7 \cdot 10^{10}}{2{,}7 \cdot 10^{21}} = 1{,}37 \cdot 10^{-11} \text{ сек.}^{-1},$$

а период полураспада радия

$$T_{Ra} = \frac{0{,}695}{\lambda_{Ra}} = 5 \cdot 10^{10} \text{ сек.} = 1600 \text{ лет.}$$

Итак, период полураспада радия равен 1600 годам. Лишь за 1600 лет интенсивность его излучения уменьшится наполовину.

Когда эти данные были получены, стало ясным, почему прежде казалось, что радиоактивные вещества излучали лучи с постоянной интенсивностью. В действительности оказалось, что и радий не вечен. Испуская радиоактивные лучи, он исчезает, превращаясь в гелий и радон.

Ещё более поразительные цифры получились для урана. Количество альфа-частиц, испускаемых одним граммом урана, было определено таким же способом, как и для

радия. Оказалось, что один грамм урана испускает в одну секунду $1{,}25 \cdot 10^4$ альфа-частиц. Повторяя для урана расчёт, который уже был произведён для радия, мы находим

$$\lambda_U = 5 \cdot 10^{-18}\ \text{сек.}^{-1},$$

$$T_U = \frac{0{,}695}{\lambda_U} = 1{,}45 \cdot 10^{17}\ \text{сек.} = 4{,}4 \cdot 10^9\ \text{лет},$$

где λ_U означает постоянную распада урана, а T_U— период его полураспада. Уран распадается столь медленно — наполовину за четыре с половиной миллиарда лет,— что не удивительно, что учёные, впервые познакомившиеся с радиоактивностью, считали радиоактивность урана вечной. В действительности количество урана и радия вследствие распада всё время уменьшается, а вместе с тем ослабевает и их радиоактивность.

Период полураспада радия 1600 лет. Если бы запасы радия не пополнялись, то через 16 000 лет его осталась бы только одна тысячная доля, а через 32 000 лет — всего лишь одна миллионная от начального количества. Через несколько сот тысяч лет от радия практически не осталось бы и следа.

Так было бы, если бы на земле не было урана и если бы уран, распадаясь, не пополнял запасы радия. Вот почему мы находим радий только вместе с ураном. Более того, между количеством урана и радия в руде должно существовать определённое соотношение. Допустим, что мы взяли кусок чистого урана, в котором вначале нет радия. В процессе распада урана стал бы возникать радий. Его количество по мере распада урана всё возрастало бы и возрастало, если бы радий в свою очередь не распадался сам.

Количество распадающихся атомов радия зависит от их числа. По мере возрастания количества радия будет возрастать и число распадающихся атомов. Распад радия будет уменьшать накопление его атомов. Рост примеси радия к урану начнёт замедляться, и чем больше будет радия, тем сильнее замедлится его дальнейшее накопление. Наконец, радия накопится в уране так много, что количество распадающихся атомов радия сделается равным количеству атомов радия, вновь возникающих из урана. Наступит равновесное состояние, и хотя распад урана будет продолжаться, хотя новые атомы радия и будут возникать, тем

не менее общее количество радия увеличиваться не будет, ибо, как мы уже отметили ранее, старых атомов радия исчезает вследствие распада столько же, сколько возникает новых.

Легко найти соотношение между количеством радия и урана при равновесном состоянии.

В самом деле, если урана в руде N_{U} грамм, то в одну секунду должно образовываться $\lambda_{U} \cdot N_{U}$ грамм радия, где λ_{U}— постоянная распада урана. С другой стороны, если в руде N_{Ra} грамм радия, то в секунду должно исчезать $\lambda_{Ra} \cdot N_{Ra}$ грамм радия. Здесь λ_{Ra}— постоянная распада радия. В состоянии радиоактивного равновесия эти оба количества равны. Следовательно,

$$\lambda_{Ra} \cdot N_{Ra} = \lambda_{U} \cdot N_{U}$$

или

$$\frac{N_{Ra}}{N_{U}} = \frac{\lambda_{U}}{\lambda_{Ra}} = \frac{T_{Ra}}{T_{U}} = \frac{1600}{4,4 \cdot 10^{9}} = 3,6 \cdot 10^{-7}.$$

Таким образом, мы приходим к выводу, что между количеством радия и урана в руде должно существовать определённое и неизменное соотношение, равное отношению периодов их полураспада, а именно, на 3 *т* урана в руде, достигшей состояния радиоактивного равновесия, должен приходиться 1 *г* радия. Конечно, это будет верно в том случае, если урановая руда будет существовать так долго, что равновесное состояние между радием и ураном успеет установиться.

Вывод соотношения $\frac{N_{Ra}}{N_{U}} = 3,6 \cdot 10^{-7}$, к которому мы пришли на основе заключений, связанных с периодами жизни урана и радия, был проверен на опыте. Был исследован химический состав большого количества урановых руд, добытых в различных местах земного шара, и оказалось, что в них (за очень немногими исключениями) процентное содержание радия по отношению к урану всегда одно и то же — 1 *г* радия приходится в среднем на 3,2 *т* чистого урана. Согласие с теоретическим результатом (1 *г* радия на 3 *т* урана) прекрасное.

Небольшое расхождение между этими двумя числами, повидимому, является результатом погрешностей в измере-

ниях. Поэтому мы с полным основанием можем сделать заключение, что опыт ещё раз подтвердил выводы теории радиоактивного распада.

Ещё об энергии, заключённой в атомах радия

Мы уже упоминали ранее, что радий непрерывно выделяет энергию. По измерениям Кюри грамм радия в один час выделяет 140 малых калорий. Но за это время распадается лишь очень малая часть его — всего $5 \cdot 10^{-8}$ *г*. Следовательно, когда распадётся весь грамм радия, то при этом выделится громадное количество энергии, равное $280 \cdot 10^{4}$ больших калорий.

Для того чтобы стало ясным, как велика эта цифра, сравним её с энергией, выделяемой при обычных химических реакциях.

Наиболее энергичная реакция имеет место при горении водорода. Один грамм водорода, сгорая, т. е. соединяясь с восемью граммами кислорода, выделяет 34 больших калории, т. е. приблизительно в 100 000 раз меньше, чем один грамм радия. Уже это сравнение показывает, как велики запасы энергии, заключённые в атомах радия. В дальнейшем мы увидим, что запасы энергии в атомных ядрах значительно больше, чем это следует из приведённых здесь данных.

Радиоактивные семейства

Некоторые радиоактивные вещества, распадаясь, дают начало новым веществам, которые также обладают радиоактивными свойствами. Так, мы знаем, что из урана образуется радий, а из радия — радон (эманация), который также радиоактивен. На какие продукты распадается радон? Радиоактивны ли они? Получается ли радий прямо из урана или он является продуктом, образующимся в результате многих радиоактивных превращений?

Естественно, что учёных интересовала полная история всех радиоактивных превращений и взаимная связь образующихся при этом веществ. Цепь взаимных превращений оказалась очень длинной и разобраться во всём этом было нелегко. Пришлось использовать многие особенности радиоактивного распада, пока, наконец, вся картина не стала ясной,

а характер всех превращений не оказался распознанным и строго доказанным.

В этих работах широко использовалось то обстоятельство, что образующиеся продукты радиоактивного распада отличаются по химическим свойствам от породивших их веществ, а также и то, что период полураспада каждого радиоактивного вещества является постоянной величиной, характерной для данного вещества, и что энергия частиц, испускаемых в процессе того или иного распада, оказалась также величиной, характерной для данного распада.

Пользуясь этими особенностями радиоактивного распада, учёные смогли установить генетическую связь между всеми продуктами распада. Совокупность всех продуктов распада данного элемента получила название радиоактивного семейства. Долгое время мы знали три таких семейства: уранарадия, тория и актиния. В таблицах I—III мы приводим схемы взаимных превращений в этих семействах. В последние годы удалось установить существование четвёртого семейства — семейства нептуния, которое будет приведено в главе XI.

В схемах радиоактивных превращений в семействах урана, тория и актиния символ каждого образующегося в результате превращения продукта заключён в кружок, внутри которого помещены также два важных числа, характеризующих вещество, образующееся в результате превращения. Верхнее число обозначает массовое число образующегося атома. Массовое число характеризует массу атома. Оно представляет собой ближайшее целое число к значению атомного веса данного вещества. Нижнее число обозначает атомный номер (номер элемента в периодической системе, определяющей его химические свойства). Между родительским веществом и дочерним поставлена стрелка, показывающая направление радиоактивного превращения. Над стрелкой или возле неё мы ставим греческие буквы: либо α, либо β. Буква α означает, что в процессе данного превращения испускаются альфа-лучи — ядра атомов гелия. Буква β означает, что в процессе превращения испускаются бета-лучи — электроны. Числа, помещённые под стрелкой, означают периоды полураспада, а буквы при них — секунды, минуты, часы, дни и годы.

Таблица I

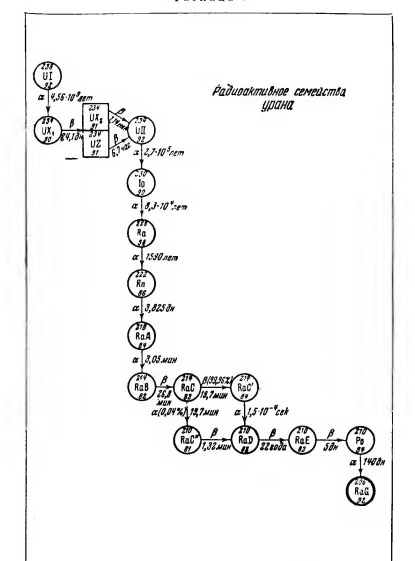

Радиоактивное семейства урана
238 UI 92
α 4,56·10⁹ лет
234 UX₁ 90
β 24,1 дн
234 UX₂ 91
234 UZ 91
β 1,14 мин
β 6,7 час
234 UII 92
α 2,7·10⁵ лет
230 Io 90
α 8,3·10⁴ лет
226 Ra 88
α 1590 лет
222 Rn 86
α 3,825 дн
218 RaA 84
α 3,05 мин
214 RaB 82
β 26,8 мин
214 RaC 83
β (99,96%) 19,7 мин
214 RaC' 84
α (0,04%) 19,7 мин
α 1,5·10⁻⁴ сек
210 RaC'' 81
β 1,32 мин
210 RaD 82
β 22 года
210 RaE 83
β 5 дн
210 Po 84
α 140 дн
206 RaG 82

Таблица II

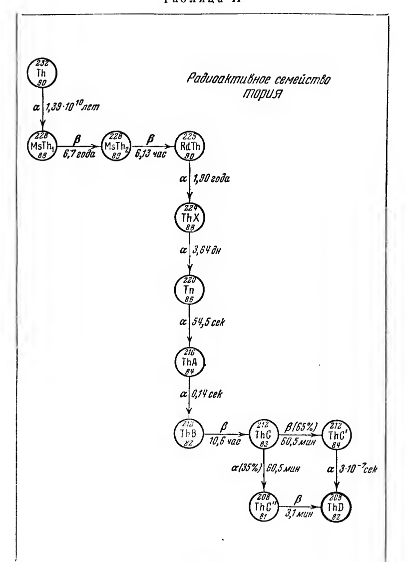
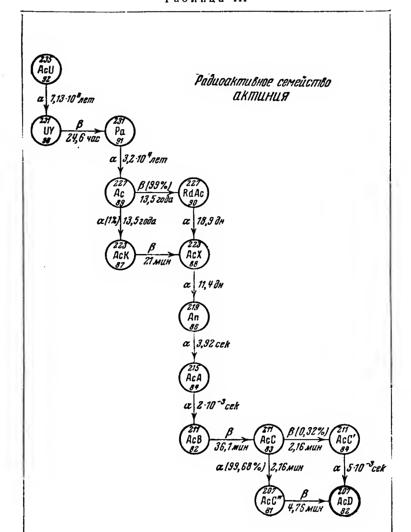

Радиоактивное семейство тория
232 Th 90
α 1,39·10^10 лет
228 MsTh1 88
β 6,7 года
228 MsTh2 89
β 6,13 час
228 RdTh 90
α 1,90 года
224 ThX 88
α 3,64 дн
220 Tn 86
α 54,5 сек
216 ThA 84
α 0,14 сек
212 ThB 82
β 10,6 час
212 ThC 83
β(65%) 60,5 мин
212 ThC' 84
α(35%) 60,5 мин
α 3·10^-7 сек
208 ThC'' 81
β 3,1 мин
208 ThD 82

Таблица III


Радиоактивное семейство актиния
235
AcU
92
α 7,13·10⁸ лет
231
UY
90
β
24,6 час
231
Pa
91
α 3,2·10⁴ лет
227
Ac
89
β (99%)
13,5 года
227
RdAc
90
α (1%) 13,5 года
α 18,9 дн
223
AcK
87
β
21 мин
223
AcX
88
α 11,4 дн
219
An
86
α 3,92 сек
215
AcA
84
α 2·10⁻³ сек
211
AcB
82
β
36,1 мин
211
AcC
83
β (0,32%)
2,16 мин
211
AcC'
84
α (99,68%) 2,16 мин
α 5·10⁻³ сек
207
AcC''
81
β
4,76 мин
207
AcD
82

Прн рассмотреннн превращений, представленных в схемах семейств урана, торня и актнния, удалось установить ряд весьма замечательных следствий. Первое нз этнх следствнй, которое мы здесь отметим, получило названне «*правила сдвига*». Правило сдвига характеризует нзмененне хнмнческнх свойств вещества, происходящее в результате радноактнвного распада. Сопоставляя атомные номера роднтельского и дочернего веществ, мы легко заметнм, что в случае альфа-распада, т. е. распада с нзлученнем альфа-лучей, атомный номер вещества уменьшается на две еднницы. Еслн же происходнт бета-превращение, т. е. еслн в процессе распада нзлучаются электроны, то атомный номер дочернего вещества увелнчивается на единицу. Так, напрнмер, путём нспускания альфа-частиц из радия возннкает радон; атомный номер радня 88, атомный номер радона 86. RaC образуется из RaB (табл. I) путём нспускання бета-частнц. Атомный номер RaB равен 82, а атомный номер RaC — 83, т. е. на еднннцу больше. Вот это-то нзмененне атомного номера, происходящее при радиоактивном распаде, н составляет сущность правнла сдвнга, открытого Фаянсом н Соддн н формулируемого следующнм образом: *если при распаде какого-нибудь радиоактивного элемента испускаются альфа-лучи, то дочерний продукт, образующийся в результате такого превращения, будет представлять собой (по химическим свойствам) элемент, располагающийся в таблице Менделеева на две клетки левее родительского; если же радиоактивное вещество распадается с испусканием бета-лучей (электронов), то образующееся дочернее вещество будет по своим химическим свойствам представлять элемент, располагающийся в таблице Менделеева на одну клетку правее родительского.*

Очевидно, что атомный вес элемента, образовавшегося в результате альфа-распада, будет на четыре единнцы меньше исходного. Атомный вес элемента, образовавшегося путём бета-распада, будет такнм же, как и у исходного элемента.

Правило сдвнга нграет очень большую роль в обосновании современной теории атомных ядер. Позже мы ещё раз вернёмся к нему, а сейчас рассмотрим другие следствия, вытекающне нз установленной схемы радноактнвных превращеннй в семействах урана, тория н актнння.

Изотопы

Рассматривая схемы превращений всех трёх семейств, мы видим, что существует много различных радиоактивных веществ, тождественных по своим химическим свойствам. Тождественность химических свойств в нашей схеме выражается тем, что у всех этих веществ оказывается один и тот же атомный номер. Так, например, атомный номер 90 в наших схемах имеют шесть различных веществ: уран «икс один» (UX_1) и ионий (Io), торий (Th) и радиоторий (RdTh), уран «игрек» (UY) и радиоактиний (RdAc).

Все эти вещества резко отличаются друг от друга по своим радиоактивным свойствам. UX_1 излучает при распаде бета-лучи, а ионий — альфа-лучи; радиоторий и радиоактиний также излучают при распаде альфа-лучи, но периоды распада их отличаются друг от друга. Ионий распадается наполовину за 83 000 лет; радиоторий — всего лишь за 1,9 года, радиоактиний — и того меньше — за 18,9 дня. Масса атомов образующихся радиоактивных веществ также различна. Так, массовое число иония равно 230 атомным единицам, массовое число UY равно 231, массовое число радиотория — 228, тория — 232, радиоактиния — 227, а массовое число UX_1 составляет 234 атомные единицы. Все эти вещества, как мы видим, различны, тем не менее химические свойства их совершенно тождественны. Эта поразительная тождественность химических свойств у совершенно различных атомов была впервые обнаружена ещё в 1906 г. на примере иония и тория. Смешав однородные соединения тория и иония, учёные убедились, что никаким способом не удаётся снова их разделить. При всех химических превращениях ионий и торий ведут себя совершенно одинаково.

Радиоактивные превращения показывают, следовательно, что существуют, по крайней мере среди радиоактивных веществ, различные разновидности одних и тех же химических элементов. Эти разновидности элементов различаются по своим радиоактивным свойствам и поэтому могут быть отличимы друг от друга. Особенно замечательным оказалось то, что различные разновидности химических элементов отличаются друг от друга атомным весом (масса атомов, измеренная в атомных единицах, численно совпадает с атомным весом). Напомним здесь, что до этого времени

именно атомный вес считали тем основным признаком, по которому систематизируются химические элементы; тут же оказалось, что вещества, сильно различающиеся по атомному весу, тождественны по химическим свойствам. Например, UX_1 имеет атомный вес 234, а радиоактиний 227. Между тем химические свойства их совершенно одинаковы. Приведённый пример не единичен. Радий В (RaB) имеет атомный вес 214, а химически тождественный ему торий D (ThD) имеет атомный вес 208. Впоследствии мы увидим, что не атомный вес определяет поведение химических элементов.

Итак, радиоактивные превращения показывают, что может существовать несколько различных представителей одних и тех же химических элементов. Более того, повидимому, это свойство присуще не только радиоактивным веществам, но и стабильным, устойчивым элементам. В самом деле, в конце превращений уранового семейства находится радий G. Его атомный вес 206. В конце превращений семейства тория образуется торий D. Его атомный вес 208. И торий D и радий G по химическим свойствам тождественны свинцу. В силу этого химического сходства радий G называют радиевым свинцом, торий D — ториевым свинцом. Таким образом, устойчивый элемент свинец тоже имеет несколько представителей. По предложению Содди, который первым усмотрел среди радиоактивных продуктов наличие разновидностей химических элементов, эти различные представители одного и того же химического элемента стали называть изотопами (от греческого «изос» — равный и «топос»— место), т. е. элементами, имеющими одинаковое место в периодической системе. Следовательно, изотопы — это разновидности одного и того же элемента, имеющие различный атомный вес. Последнее, т. е. различие в атомном весе, мы здесь подчёркиваем, чтобы отличить возможный случай, когда различные представители одного и того же химического элемента, различающиеся по радиоактивным свойствам, имеют, кроме того, и одинаковый атомный вес. Такой случай мы также находим среди продуктов радиоактивных превращений. Так, уран Z и уран X_2, оба образующиеся из урана X_1 (см. табл. I), имеют и одинаковый атомный номер (т. е. тождественны по своим химическим свойствам) и одинаковый атомный вес, равный 234. Оба они образуются из урана X_1 путём бета-превращения. Обладая одинаковым

атомным номером и одинаковым атомным весом, они тем не менее различаются своими радиоактивными свойствами. Уран Z излучает бета-лучи, т. е. электроны. Период полураспада его 6,7 часа. Уран X_2 также излучает электроны, но период полураспада его всего лишь 1,14 минуты. Уран X_2 распадается в 350 раз быстрее, чем уран Z. Оба вещества, как мы видим, различны, тем не менее оказывается, что их атомные номера и атомные веса одинаковы. Такие вещества называют изомерами. (В отличие от других радиоактивных веществ символ изомеров уран X_2 и уран Z мы помещаем в таблице I внутри квадрата, а не внутри круга.) Изомеры встречаются сравнительно редко, между тем как изотопы весьма распространены. Так, представителей химического элемента номер 90 в семействах урана, тория и актиния мы нашли шесть, представителей элемента 91 имеется три, представителей элемента 82 имеется семь, элемента 84 — тоже семь, элемента 83 — четыре.

Как мы увидим в дальнейшем, и нерадиоактивные химические элементы тоже представлены многими изотопами.

Некоторые итоги

Подведём некоторые итоги того, что было изложено в этой главе. Правило сдвига, окончательно установившее цепь взаимных превращений радиоактивных элементов, было сформулировано в 1913 г., т. е. спустя почти двадцать лет со дня открытия радиоактивности. Загадочное некогда явление потеряло свою таинственность. Многое ещё было неясно, но сущность явления радиоактивности уже была понята. Радиоактивные лучи указывают нам на то, что происходит превращение атомов одного сорта в атомы другого сорта. Радиоактивные лучи — это сигнал о превращении химических элементов. Превращение происходит не со всем веществом сразу. Лишь отдельные атомы претерпевают превращение в данный момент времени. Другие атомы распадутся позже.

Вероятность распада есть величина постоянная. У одних веществ она мала: такие вещества распадаются медленно (уран, торий). Проходят миллиарды лет, прежде чем они распадутся наполовину. У других радиоактивных веществ этот процесс идёт быстро. Вероятность распада атомов та-

ких веществ велика. Половина взятого вещества у некоторых из них (ThC') распадается за миллионную долю секунды.

Радиоактивные превращения бывают двоякого типа. В превращениях одного типа излучаются электроны, в превращениях другого типа излучаются альфа-частицы. Было доказано, что альфа-частицы — это дважды ионизированные атомы гелия. Тождественность альфа-частиц и атомов гелия подтверждена как измерением отношения e/m (заряда к массе), так и непосредственным наблюдением спектра газа, образованного альфа-частицами, проникшими в пустотную трубку. Характер превращения в некоторых случаях проверен рядом контрольных опытов. Особенно тщательно было изучено превращение радия в радон. Взвешиванием было доказано, что сумма масс альфа-частицы и атома радона равна массе атома радия.

В процессе изучения радиоактивности был разработан ряд остроумных и тонких методов наблюдения и счёта отдельных альфа-частиц и электронов. При помощи этих методов удалось произвести подсчёты зарядов отдельных частиц и сделать ряд важнейших заключений, часть которых будет рассмотрена в следующих главах.

Открытие радиоактивности, установление сложного состава атомов и превращения одних элементов в другие, имело большое значение в борьбе материалистического мировоззрения с идеализмом. Крушение метафизических представлений о неизменности и неделимости атомов, последовавшее за открытием явления радиоактивности, и создание новых представлений о природе электронов и атомов, более полно отражающих свойства этих частиц, были использованы реакционными философами для протаскивания идеалистического мировоззрения, для утверждения о якобы субъективном характере нашего познания. Этим попыткам использовать новейшие достижения физики для борьбы с материализмом дал сокрушительный отпор В. И. Ленин. В самый разгул реакции в России в 1909 г. появилось его замечательное произведение «Материализм и эмпириокритицизм». Беспощадно разрывая паутину мистицизма, идеализма, эмпириокритицизма, Ленин в этой книге противопоставил им теорию познания диалектического материализма. Он показал, что «Новейшие открытия естествознания — радий,

электроны, превращение элементов — замечательно подтвердили диалектический материализм Маркса...» *), ибо, как писал Ленин, «Разрушимость атома, неисчерпаемость его, изменчивость всех форм материи и ее движения всегда были опорой диалектического материализма» **).

Дальнейшее развитие наших знаний об атомных ядрах, которое будет описано в последующих главах, как нельзя более наглядно иллюстрирует всю глубину высказываний В. И. Ленина о том, что «Электрон так же *неисчерпаем*, как и атом, природа бесконечна, но она бесконечно *существует...*» ***), и подтверждает положение диалектического материализма об изменчивости всех форм материи и её движения.

Гипотеза радиоактивного распада опровергла установившееся ранее мнение о неизменности атомов. Наличие большого количества радиоактивных изотопов поставило под сомнение предположение о том, что периодичность в химических свойствах элементов определяется значением атомных весов. Всё это сыграло большую роль в развитии науки, изучающей свойства атомов. Однако ещё большее значение имели те явления и исследования, которые составят предмет следующей главы.

*) В. И. Ленин, Соч., т. 19, стр. 4, Госполитиздат, 1948.
**) В. И. Ленин, Соч., т. 14, стр. 268, Госполитиздат, 1947.
***) В. И. Ленин, Соч., т. 14, стр. 249, Госполитиздат, 1947.

ГЛАВА II

ЯДЕРНАЯ МОДЕЛЬ АТОМА

В этой главе мы расскажем о работах, в результате которых было с несомненностью установлено, что внутри атомов существуют так называемые атомные ядра, свойствам которых посвящена вся эта книга.

Рассеяние альфа-частиц

Всё началось с незначительного на первый взгляд обстоятельства. Резерфорд обнаружил, что след пучка альфа-частиц, прошедшего через узкую щель, получается на фотографической пластинке различным в зависимости от того, находился ли между щелью и фотопластинкой слой воздуха или нет. Оказалось, что если откачать воздух из сосуда, в котором находились источник альфа-частиц, щель и фотографическая пластинка, то след, оставляемый альфа-лучами на пластинке, даёт правильное изображение щели с резкими краями. Если этот же опыт производить в нормальных условиях, оставляя в сосуде воздух при нормальном давлении, то результат опыта получается иной. След, оставляемый альфа-частицами на фотопластинке, только весьма отдалённо напоминает по своей форме щель, сквозь которую альфа-частицы были пропущены: он значительно шире, и края его размыты.

Не составляло большого труда найти причину такого поведения пучка. Если воздух удалён из прибора, то альфа-частицы пробегают путь между щелью и фотопластинкой, не встречая молекул воздуха. Они не претерпевают столкновений и, следовательно, не изменяют направления своего движения. Поэтому след на фотопластинке получается отчётливым и представляет правильное изображение щели.

Иначе обстоит дело, когда между щелью и фотопластинкой находится слой воздуха. В этом случае на пути от щели до пластинки альфа-частицы сталкиваются с молекулами воздуха, в результате чего их первоначальное направление меняется. Характер столкновения (лобовой или косой удар) и число таких столкновений для различных альфа-частиц несколько различаются: одни альфа-частицы отклоняются на бо́льший угол, другие — на меньший, поэтому наличие таких столкновений как бы рассеивает первоначальный пучок. Это совершенно естественное объяснение было сразу же предложено Резерфордом, при этом само явление получило название «рассеяния» альфа-частиц.

Опыты Гейгера и Марсдена

Явление рассеяния альфа-частиц было открыто в 1906 г. В дальнейшем его изучением занимались многие учёные. Легко понять причины, побудившие заняться изучением этого явления: если рассеяние альфа-частиц представляет собой результат столкновения их с молекулами воздуха, то, следовательно, изучение этого рассеяния означает изучение взаимодействия альфа-частиц с веществом. Можно было надеяться, что это изучение дополнит существовавшие тогда скудные знания свойств радиоактивных лучей.

Многочисленные исследования в этом направлении были выполнены Гейгером и Марсденом. Они изучали рассеяние альфа-частиц не только на молекулах воздуха, но пропускали альфа-лучи также и через тонкие слои металлов и других веществ. Фотографическую пластинку они заменили более чувствительным индикатором — флюоресцирующим экраном, на котором могли наблюдать сцинтилляции отдельных альфа-частиц.

Применив этот значительно более чувствительный метод наблюдения альфа-частиц, они заметили, что, в то время как подавляющая часть альфа-частиц только незначительно меняет направление своего движения, некоторые частицы изменяют его весьма сильно. Более того, оказалось, что некоторые альфа-частицы меняют направление своего движения на 90°, так что их можно наблюдать только в том случае, если флюоресцирующий экран поставить сбоку. В одном из опытов экран был поставлен так, что альфа-части-

цы могли попасть на него только в том случае, если бы в результате столкновения они стали двигаться обратно, т. е. в направлении, противоположном их движению до столкновения. При внимательном наблюдении удалось и в этом случае заметить появление сцинтилляций, правда, в очень незначительном количестве.

При изучении рассеяния альфа-частиц на углы, бóльшие 90°, было найдено, что относительное число альфа-частиц, рассеянных на такие большие углы, различно для различных веществ. Так, тонкие металлические пластинки из металлов с большим атомным весом рассеивают альфа-частицы на углы, бóльшие 90°, в большем количестве, чем пластинки такой же толщины из металлов с малым атомным весом. С возрастанием толщины пластинки растёт число альфа-частиц, рассеянных на большие углы.

Статическая модель атома

Вдумаемся в результаты опытов по рассеянию частиц. Вспомним, что альфа-частицы несутся с громадной скоростью, измеряемой десятками тысяч километров в секунду. Для того чтобы даже слегка изменить направление движения альфа-частицы за тот малый промежуток времени, в течение которого она находится достаточно близко к какому-либо из атомов вещества, нужно сообщить ей громадное ускорение. Для того же, чтобы отбросить альфа-частицу назад, требуются поистине чудовищные силы. Откуда эти силы могут возникнуть?

Мы уже знаем, что альфа-частица несёт электрический заряд и что электрическое поле оказывает на неё определённое воздействие. Могут ли в атомах существовать электрические поля с напряжённостью, достаточной для такого воздействия?

В то время в вопросе о строении атома физики придерживались гипотезы, развитой Дж. Дж. Томсоном. Согласно этой гипотезе считалось, что все атомы состоят из электрических зарядов. Отрицательные заряды — электроны, по этой модели атома, как бы плавают в материи, наполняющей весь объём атома и заряженной положительным зарядом. Электроны, плавающие в этой среде, могут совершать

колебания. В этом случае атом должен излучать электромагнитные волны, т. е. излучать свет.

Сами атомы, по Томсону, имеют шарообразную форму. Полный заряд каждого атома равен нулю. Это значит, что количество положительно заряженной материи таково, что её заряд полностью компенсирует заряд электронов.

Модель атома Томсона объяснила некоторые известные в то время факты. Более того, одно из основных её положений было подтверждено прямым опытом. Было установлено, что металлы при нагревании испускают электроны. Наличие свободных электронов наблюдалось также при разряде в газах. Оба эти факта показывают, что электроны действительно имеются в атомах. Иначе откуда бы они взялись в упомянутых выше опытах?

Число электронов в атоме под влиянием внешнего воздействия может уменьшаться, а в некоторых случаях, наоборот, увеличиваться. Этим объяснялось возникновение положительных и отрицательных ионов.

Однако уже само существование радиоактивности трудно примирить с этой моделью атома. Мы хорошо уже знаем, что в составе радиоактивного излучения находятся и альфа-лучи. Откуда же берутся эти концентрированные положительные заряды? Ведь, по Томсону, положительный заряд как бы размазан по всему атому.

Опыты по рассеянию альфа-частиц с ещё большей силой подчеркнули непригодность атомной модели Томсона. Они указывают на необходимость допустить существование внутри атома концентрированных положительных зарядов. В самом деле, по закону Кулона электрическая сила, действующая на заряд, пропорциональна величине заряда и обратно пропорциональна квадрату расстояния между зарядами. Чтобы получить, исходя из закона Кулона, силу, достаточную для отброса альфа-частицы назад, надо допустить, что альфа-частица подходит к действующему на неё заряду на расстояние порядка 10^{-12} *см*. Столь сильно должен быть сконцентрирован заряд, отклоняющий альфа-частицу на большой угол! Однако таким концентрированным зарядом не может быть электрон. Масса электрона мала по сравнению с массой альфа-частицы. Альфа-частица в семь тысяч раз с лишним тяжелее электрона. При таком соотношении весов соударение альфа-частицы с электроном будет напоми-

нать столкновение быстро несущегося автомобиля (весом примерно в 1 *т*) с маленьким камешком (диаметром примерно в 5—6 *см*), лежащим на мостовой. В результате такого столкновения камешек, конечно, может быть отброшен очень далеко, но автомобиль практически не изменит своего движения. Ясно, что столкновения альфа-частиц с электронами, если они и происходят, не могут быть причиной отклонения альфа-частиц на большие углы. Такими столкновениями можно было пытаться объяснить лишь незначительные отклонения альфа-частиц. А так как альфа-частицы отклоняются (хотя и очень редко) на очень большие углы, то, следовательно, внутри атома должны находиться положительные электрические заряды, сконцентрированные в области, поперечные размеры которой не более 10^{-12} *см*, в которой в то же время должна быть сконцентрирована и значительная часть массы атома. Только в этих условиях при взаимодействии (столкновении) с зарядом, связанным с массой, значительно превосходящей массу альфа-частицы, последняя может сильно изменить направление своего движения и отскочить назад. Столкновение в этом случае будет напоминать удар резинового мячика о тяжёлый камень. При таком столкновении мяч с лёгкостью отскакивает назад.

Из этих простых рассуждений вытекают исключительные по своему значению следствия. Очевидно, что масса атома не размазана по всему его объёму, а сконцентрирована вместе с зарядом в очень малом объёме. Поскольку отрицательный заряд мы приписываем электронам, непригодность которых для объяснения рассеяния альфа-частиц совершенно очевидна, естественно было приписать этой области, в которой сосредоточена масса атома, положительный заряд.

Ядерная модель атома

Соображения, которые мы привели выше, представляют собой лишь незначительное видоизменение идей Резерфорда, легших в основу его ядерной модели атома. По Резерфорду, атом состоит из ядра, в котором сосредоточены почти вся масса атома и весь его положительный заряд. Вокруг ядра движутся отдельные электроны. Число электронов таково, что полный заряд атома равен нулю. Область, занятая

ядром, весьма мала по сравнению с объёмом всего атома в целом.

Когда альфа-частица проходит вблизи одного из электронов, находящихся в атоме, происходит сильное взаимодействие между альфа-частицей и электроном. В этом случае можно говорить о столкновении альфа-частицы с электроном. Альфа-частица при этом столкновении может передать электрону сравнительно большую энергию, в результате чего электрон окажется выброшенным из атома. В результате такого столкновения образуются два заряда — положительно заряженный остаток атома, лишённый одного электрона (положительный ион), и электрон, обычно присоединяющийся в воздухе к какому-нибудь нейтральному атому, образуя отрицательный ион. Таким образом, результатом столкновений альфа-частиц с электронами является ионизация молекул и атомов. Напомним, что способность ионизировать газы — это одно из первоначально обнаруженных свойств радиоактивных лучей.

Когда альфа-частица проходит непосредственно вблизи ядра, то происходит заметное изменение в направлении движения самой альфа-частицы, которое мы и называем рассеянием альфа-частицы.

Совершенно естественно, что эта новая модель атома возбудила громадный интерес в среде физиков: ведь ещё незадолго до того некоторыми учёными ставилась под сомнение реальность существования атомов, а теперь обсуждались уже детали их строения. Необходимо было заняться проверкой правильности гипотезы Резерфорда, поисками новых фактов, подтверждающих её. Много выдающихся учёных принялось за проверку и изучение новой модели атома.

Прежде всего новую идею следовало подвергнуть количественной проверке. Основу этому положил сам Резерфорд, выполнив математический анализ явления рассеяния альфа-частиц.

Напомним ещё раз, как ставится задача: альфа-частица при каждом столкновении с ядром изменяет направление своего движения. Как сильно она изменит направление своего движения после одного столкновения с ядром?

На рис. 8 схематически представлена траектория альфа-частицы. При столкновении с ядром она изменила направление своего движения на угол ϑ. Очевидно, что угол откло-

нения альфа-частицы будет тем больше, чем сильнее она будет взаимодействовать с ядром, т. е. чем ближе она подойдёт к нему. Одни частицы будут проходить близко от ядра, другие — на более далёком расстоянии. Поэтому альфа-частицы, идущие сначала в одном направлении, после прохождения некоторого слоя вещества отклонятся различным образом. Задача, следовательно, должна заключаться в том, чтобы рассчитать, сколько частиц (в результате всевозмож-

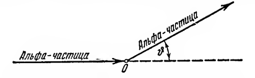


Рис. 8. Рассеяние альфа-частицы ядром атома, находящимся в точке O.

ных случаев столкновения) рассеется на малые углы, а сколько на большие. Эти расчёты и произвёл Резерфорд. Он подсчитал, какая часть из однородного пучка альфа-частиц рассеется на угол ϑ при прохождении слоя вещества, толщину которого будем обозначать буквой s. Конечно, нам сразу должно быть ясно, что результат рассеяния будет зависеть не только от толщины слоя вещества, но ещё и от его плотности, ибо чем плотнее этот слой, тем больше атомов в нём находится и тем больше вероятность столкновения альфа-частицы с ядром. Очевидно поэтому, что вероятность рассеяния альфа-частиц зависит и от толщины слоя s и от числа атомов n, находящихся в единице объёма данного вещества.

Далее, для вычисления угла отклонения ϑ необходимо было знать, каковы силы, действующие между альфа-частицей и ядром. Предполагалось, что это — силы электрического отталкивания, подчиняющиеся закону Кулона, следовательно, они должны меняться обратно пропорционально квадрату расстояния между частицей и ядром и, кроме того, должны быть пропорциональны заряду ядра и заряду альфа-частицы. Заряд альфа-частицы был уже известен. Он, как читатель помнит, равняется двум элементарным единицам. А заряд ядра? По этому поводу в первоначальной теории Резерфорда ничего нельзя было сказать, и в

своих расчётах он просто обозначал величину этого заряда буквой Z.

В результате этих расчётов Резерфорд получил следующую формулу:

$$N = N_0 \cdot n \cdot s \left(\frac{Ze^2}{mu^2} \right)^2 \cdot \frac{1}{\sin^4 \frac{\vartheta}{2}} \text{*)}. \qquad (5)$$

В этой формуле N означает число альфа-частиц (из общего числа N_0), рассеянных по прохождении слоя вещества s на угол ϑ. Другие буквенные обозначения следующие: n — число атомов в единице объёма рассеивающей среды (характеризует плотность рассеивающего вещества); Z — заряд ядра, выраженный в элементарных единицах (за элементарную единицу заряда принимается заряд электрона, обозначенный здесь буквой e); u — скорость альфа-частицы; m — её масса.

Вот эту формулу, которая получила название формулы Резерфорда, и следовало прежде всего проверить.

В этой формуле содержится ряд величин, ранее уже определённых, например: e — заряд электрона, m — масса альфа-частицы, u — её скорость, n — число атомов в единице объёма рассеивающего вещества. Но есть в формуле (5) и величина, до тех пор никогда не определявшаяся. Это — заряд ядра Z.

Если бы мы были уверены в правильности формулы (5), то, измерив число альфа-частиц, рассеянных на угол ϑ, и зная число падающих альфа-частиц, мы смогли бы из этой формулы вычислить величину Z. Но прежде надо было убедиться в правильности этой формулы. Как же её проверить?

Обратим внимание на то, что в этой формуле число альфа-частиц, рассеянных на различные углы, обратно пропорционально четвёртой степени синуса угла $\frac{\vartheta}{2}$ (ϑ — угол рассеяния). Очевидно, надо измерить число альфа-частиц, рассеянных на различные углы, и посмотреть, изменяется ли это число обратно пропорционально четвёртой степени $\sin \frac{\vartheta}{2}$.

*) В этой формуле число частиц, рассеянных на угол ϑ, отнесено к единице телесного угла.

Если окажется, что N меняется, как $\frac{1}{\sin^4\frac{\vartheta}{2}}$, то в формуле Резерфорда содержится зерно истины.

За изучение числа альфа-частиц, рассеянных на различные углы, взялись Гейгер и Марсден, уже занимавшиеся ранее рассеянием альфа-частиц. Прибор, с которым были произведены эти исследования, был устроен следующим образом (рис. 9). Внутри толстостенного цилиндра A помещались источник альфа-частиц S, металлический листок F, рассеивающий альфа-частицы, и микроскоп M, с помощью которого можно было наблюдать на экране E отдельные сцинтилляции. Источник S экранировался со всех сторон толстым слоем свинца, в одном месте которого прорезывалась узкая щель, сквозь которую проходил приблизительно параллельный поток альфа-частиц, попадающий в дальнейшем на рассеивающую пластинку F.

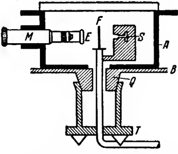


Рис. 9. Прибор Гейгера и Марсдена для проверки зависимости числа рассеянных альфа-частиц от угла рассеяния.

Корпус прибора монтировался на толстом диске B, снабжённом шлифом Q, благодаря которому весь прибор мог поворачиваться в основании T даже и тогда, когда из него был откачан воздух. Источник S и рассеиватель F были связаны с неподвижным основанием прибора, а микроскоп M и экран E — с корпусом B. При повороте всего корпуса менялось и положение экрана. Наблюдая сцинтилляции и подсчитывая число их при различных положениях экрана с микроскопом, можно было определить число альфа-частиц, рассеянных на различные углы ϑ.

Исследования, произведённые с помощью этого прибора, полностью подтвердили формулу Резерфорда. Число сцинтилляций росло пропорционально толщине рассеивателя и с

увеличением угла ϑ уменьшалось пропорционально $\frac{1}{\sin^4\frac{\vartheta}{2}}$ в полном согласии с формулой (5).

Подтверждение правильности этой формулы означало и признание ядерной модели атома. Слово «атомное ядро» приобретает с этого момента право гражданства.

Доказав правильность формулы Резерфорда, можно было в дальнейшем воспользоваться ею для определения Z — заряда атомных ядер. Измерения Z были сделаны для нескольких различных металлов. Оказалось, что заряд ядра атома платины равен 77 элементарным единицам, заряд ядра атома серебра — 46, а заряд ядра атома меди — 29. Точность измерений достигла 1—2%; следовательно, в определении заряда ядер не могло быть ошибки более чем на одну единицу.

Связь между зарядом ядра и местом элемента в периодической системе Д. И. Менделеева

Определение величины заряда ядра у меди, серебра и платины, произведённое на основании анализа рассеяния альфа-частиц, позволило сделать вывод исключительной важности. Чтобы понять, в чём суть дела, обратимся к менделеевской таблице элементов (помещённой в конце книги).

Расположим все химические элементы в порядке, указанном в этой таблице, и перенумеруем их последовательно. Полученный элементом номер называется *атомным номером* элемента. Следовательно, атомный номер — это порядковый номер места, которое данный элемент занимает в таблице Менделеева. Так, например, водород, находящийся в таблице на первом месте, имеет атомный номер, равный единице. Атомный номер гелия равен двум — гелий находится на втором месте в таблице Менделеева. Литий имеет атомный номер, равный трём (он находится на третьем месте таблицы Менделеева), бериллий — четырём и т. д. Медь в этой таблице оказывается на двадцать девятом месте. Следовательно, её атомный номер равен 29. Но заряд ядра атома меди, который, как мы уже указывали выше, был определён из наблюдения над рассеянием альфа-частиц, также оказался равным 29 элементарным единицам. Таким образом, получается,

что величина заряда ядра атома меди совпадает со значением атомного номера меди.

Аналогичное соотношение оказалось также у серебра и платины. Серебро имеет атомный номер 47. Заряд же ядра атома серебра, вычисленный по результатам рассеяния альфа-частиц, оказался равным 46 элементарным единицам, т. е. в пределах точности измерений совпал со значением атомного номера серебра. Атомный номер платины 78, а измеренная из рассеяния альфа-частиц в платине величина заряда ядра атома платины оказалась равной 77 ± 1.

Совпадение атомных номеров меди, серебра и платины с величиной заряда их ядер не могло быть случайностью, поэтому Ван-ден-Брук, впервые сопоставивший результаты измерения заряда атомных ядер с расположением элементов в таблице Менделеева, высказал следующее предположение: *величина заряда ядра атома каждого химического элемента, измеренная в элементарных единицах заряда, равна атомному номеру*, т. е. порядковому номеру, который этот элемент имеет в таблице Менделеева.

Этот вывод позволил, наконец, понять истинную природу закономерности, открытой Менделеевым. Стало ясно, что лежит в основе таблицы Менделеева, чем отличаются атомы различных химических элементов, что определяет их химическую индивидуальность.

Вспомним, что в нормальном состоянии атом в электрическом отношении нейтрален. Следовательно, если заряд ядра атома равен Z единицам, то в атоме должно находиться Z электронов. Все атомы по своему строению аналогичны. Атом любого химического элемента состоит из ядра и электронов. Различие между атомами заключается лишь в величине заряда ядра и связанном с ним числе окружающих ядро электронов. Так, например, заряд ядра водорода равен единице. В атоме водорода находится всего лишь один электрон. С точки зрения строения атомов это — простейший элемент. Теперь понятно, почему в таблице Менделеева водород стоит первым.

В атомах гелия находится уже пара электронов, ибо заряд ядра этих атомов равен двум единицам. Отметим здесь, что альфа-частица представляет собой дважды ионизированный атом гелия. Следовательно, альфа-частица есть не

что иное, как ядро атома гелия. Её заряд, как это и должно быть, равен двум элементарным единицам.

Атом самого тяжёлого природного элемента — урана, занимающего в таблице Менделеева девяносто второе место, состоит из ядра, заряд которого равен 92 элементарным единицам, и 92 электронов.

Теперь мы располагаем ясным критерием для порядка расположения химических элементов. Путаница, которая возникала ранее, когда пытались располагать элементы строго в порядке возрастания атомного веса, например с элементами: иод — теллур, никель — кобальт и калий — аргон, легко устраняется. (Иод имеет атомный вес меньше теллура, а в таблице он стоит после него, калий легче аргона, а в таблице Менделеева стоит дальше, никель имеет атомный вес меньший, чем у кобальта, а в таблице стоит за кобальтом.) Иод должен стоять в таблице за теллуром, ибо заряд ядра иода как раз на единицу больше, нежели заряд ядра теллура. Точно так же у калия и никеля заряд ядра больше, чем соответственно у аргона и кобальта. То, что Менделеев задолго до открытия строения атома правильно расположил элементы в своей таблице, оказалось гениальным предвидением.

Вскоре были найдены совершенно надёжные доказательства правильности изложенной гипотезы.

Вспомним закон радиоактивного смещения. Согласно этому закону вещество, образующееся в итоге альфа-радиоактивного распада, располагается в таблице Менделеева на две клетки левее материнского вещества, а вещество, образующееся в итоге бета-радиоактивного распада, располагается в таблице Менделеева на одну клетку правее материнского вещества. Но по изложенной гипотезе так и должно быть: если из ядра удалить два положительных заряда, то его атомный номер делается меньше на две единицы; мы получаем, следовательно, вещество, химические свойства которого представлены элементом, расположенным в таблице Менделеева на две клетки раньше исходного. Наоборот, если мы из ядра удалим один отрицательный заряд (бета-частицу), то его положительный заряд возрастёт на единицу, вследствие чего элемент переместится по таблице Менделеева на одно место вправо — в сторону возрастания атомного номера. Какое замечательное и простое объясне-

ние сложным соотношениям, имеющим место при радиоактивном распаде!

Обратим внимание ещё на одну сторону вопроса. Положительный заряд находится только в ядре, и поэтому естественно, что возникающая в процессе радиоактивного распада альфа-частица вылетает из атомного ядра. Что же касается электронов, то их в атоме довольно много, столько, сколько элементарных единиц в заряде ядра. Однако удаление этих электронов, окружающих ядро и называемых поэтому электронами оболочки, отнюдь не создаёт атомного превращения. Атом, лишённый одного из электронов оболочки, перестаёт быть нейтральным и превращается в ион. Других изменений с ним не происходит. Ион с течением времени притянет к себе один из свободных электронов и вновь превратится в нормальный атом, ничем не отличающийся от исходного.

Совсем иначе обстоит дело, когда мы удаляем электрон из ядра. При этом заряд атома изменяется. Если он был равен Z, то теперь он будет равен $Z+1$. Такой атом тоже будет положительным ионом, ибо в оболочке у него попрежнему только Z электронов, и эти Z электронов не могут полностью нейтрализовать заряд ядра, ставший равным $Z+1$. Необходимо добавить в оболочку ещё один электрон. Когда это произойдёт, атом снова станет нейтральным. Но он будет по своим свойствам отличаться от исходного, ведя себя как атом элемента, расположенного в таблице Менделеева на единицу дальше исходного.

Итак, *радиоактивные превращения — это превращения, происходящие с ядрами атомов. При радиоактивном превращении изменяется заряд атомного ядра.* Вследствие этого меняется число электронов в оболочке атома, меняются его химические свойства. Химическая природа элемента целиком определяется зарядом ядер образующих его атомов. До тех пор, пока неизменен заряд ядра, неизменны и химические свойства атомов.

Атомы не являются неизменными образованиями. Путём изменения заряда ядра можно изменить и химические свойства атомов, превратить одни элементы в другие. Однако для такого превращения требуются весьма энергичные средства воздействия. Теория о неизменности атомов, неизменности химических элементов могла возникнуть только потому,

что процессы, с которыми сталкивались ранее, способны были воздействовать лишь на электронную оболочку атомов, не вызывая никаких изменений в атомных ядрах. Когда же происходит изменение атомных ядер, то от неизменности химических элементов не остаётся даже и следа. Радиоактивные явления отчётливо показали это, и физики поняли, наконец, в чём кроется истинная причина превращений радиоактивных элементов.

Измерение заряда ядра при помощи рентгеновских лучей

Гипотеза, согласно которой заряд ядра определяет место элемента в периодической системе Менделеева, казалась физикам очень правдоподобной. Но надо было подтвердить её прямыми опытами не только для радиоактивных элементов, стоящих в конце периодической системы, но и для остальных стабильных элементов. Для этого имелся только один путь— измерить заряды всех ядер и убедиться в том, что заряд ядра атомов каждого элемента действительно равен его атомному номеру. Особенно важно было это сделать для спорных мест таблицы Менделеева, в которых нарушался закономерный рост атомных весов. Мы имеем в виду уже упомянутые ранее группы: аргон — калий, кобальт — никель, теллур — иод.

Эта работа была выполнена Мозели. Мозели решил задачу косвенным путём. Чтобы понять суть его исследований, нам придётся очень сильно отвлечься в сторону.

Согласно Резерфорду атом всякого элемента состоит из двух основных частей: атомного ядра, которое нас интересует, и электронов (в количестве, определяемом величиной заряда ядра), образующих электронную оболочку атома, которая непосредственного отношения к теме настоящей книги не имеет. Однако оказалось, что некоторые свойства электронной оболочки атома могут быть использованы для выяснения отдельных величин, характеризующих атомное ядро, и, в частности, позволяют определить его заряд. По этой причине мы рассмотрим подробнее строение электронной оболочки атома.

Свойства электронной оболочки были впервые исследованы Бором. Приняв за основу ядерную модель атома, он нашел законы, по которым происходит движение электро-

нов вокруг ядра *). Согласно этим исследованиям Z электронов, находящихся в атоме (заряд ядра которого также равен Z), располагаются неодинаковым образом. Они образуют различные группы, распределение которых в атоме может быть схематически представлено в виде слоёв различных радиусов (рис. 10). Эти слои принято обозначать буквами K, L, M, N и т. д. Ближайший к ядру слой электронов

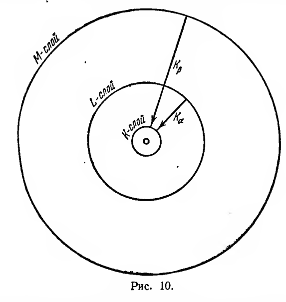


Рис. 10.

обозначается буквой K, следующий слой — буквой L; дальше идёт слой, обозначаемый буквой M, затем — N и т. д. в порядке следования букв латинского алфавита. Количество электронов, входящих в каждый из этих слоёв, ограничено; оно не может превосходить некоторой, вполне определён-

*) Электроны в атомах должны обязательно двигаться, ибо если бы они находились в покое, то под действием силы электрического притяжения к ядру они в конце концов упали бы на него. Следовательно, атом может находиться в устойчивом состоянии только в том случае, если электроны, образующие его оболочку, находятся в состоянии непрерывного движения. Аналогией может служить движение нашей Земли вокруг Солнца. Благодаря этому движению Земля не падает на Солнце, хотя всё время к нему притягивается.

ной предельной величины. Эта величина для каждого слоя различна. Так, в самом ближайшем к ядру K-слое не может быть более двух электронов. Максимальное число электронов, которое может содержаться в L-слое, равно 8. В M-слое может содержаться до 18 электронов, в N-слое максимальное число электронов равно 32. Предельные числа электронов в различных атомных слоях образуют вполне закономерный ряд. Эту закономерность легко подметить. Перенумеруем K, L, M, N и т. д. слои по порядку:

$$K,\ L,\ M,\ N,\ O,\ \ldots$$
$$1,\ 2,\ 3,\ 4,\ 5,\ \ldots$$

Квадраты этих порядковых чисел образуют другой ряд величин:

$$1,\ 4,\ 9,\ 16,\ 25,\ \ldots$$

Удвоенные значения чисел этого ряда равны, соответственно,

$$2,\ 8,\ 18,\ 32,\ 50,\ \ldots$$

и представляют собой указанные выше предельные числа электронов, заполняющих соответствующие слои электронной оболочки атома.

Знание законов распределения электронов по слоям помогло выяснить причину периодического повторения химических свойств элементов в таблице Менделеева. Мы уже выяснили, что в этой таблице атомы различных химических элементов располагаются в порядке возрастания заряда атомного ядра, следовательно, в порядке возрастания числа электронов, находящихся в электронной оболочке атома. В атоме каждого последующего элемента таблицы Менделеева ядро имеет заряд, на единицу больший, чем у предыдущего элемента, а электронная оболочка атома каждого последующего элемента имеет один добавочный электрон. В каких же слоях располагаются эти электроны? Для того чтобы ответить на этот вопрос, обратимся к рассмотрению величины энергии, которой обладают электроны, находящиеся в различных слоях.

Мы уже указывали, что электронные слои располагаются на разных расстояниях от ядра. Очевидно, что чем ближе электроны располагаются к ядру, тем большую силу при-

тяжения со стороны ядра они испытывают, ибо силы взаимодействия между зарядами изменяются обратно пропорционально квадрату расстояния между ними. Поэтому электроны, находящиеся в слое K, сильнее связаны с ядром, чем электроны, находящиеся в слое L. В свою очередь электроны, находящиеся в слое L, сильнее связаны с ядром, чем электроны слоя M, и т. д. Поскольку электроны, находящиеся в атоме, испытывают притяжение к ядру, для удаления электрона из атома необходимо совершить некоторую работу. Энергия, которую надо затратить для ионизации атома, т. е. для удаления электрона из атома, и является мерой связи электрона в атоме. Обозначим через W_K энергию, затрачиваемую на удаление электронов из K-слоя, а через W_L, W_M, W_N, . . . — энергии, необходимые для удаления электрона соответственно из L, M, N, . . . слоёв. Очевидно, что W_K будет больше, чем W_L, а W_L больше, чем W_M, и т. д. Поскольку энергия, сообщаемая электрону при удалении из слоя K больше, чем из слоя L, то очевидно, что электрон, находясь в слое K, обладает меньшей энергией, чем в слое L. Электрон в слое K имеет энергию меньшую, чем электрон в слое L, на величину ΔW:

$$\Delta W = W_K - W_L.$$

Теперь мы можем ответить на вопрос о том, как же распределяются электроны в электронной оболочке атома. Поскольку всякая система стремится перейти в такое состояние, при котором её энергия будет иметь наименьшее возможное значение, то, следовательно, электроны, попадая в атом, будут стремиться занять место по возможности в K-слое, L-слое или других ближайших к ядру свободных слоях с наименьшей энергией. Однако не все электроны могут попасть в слой K. Как мы уже указывали, в этом слое может быть не более двух электронов. Остальные электроны должны располагаться в слоях с бо́льшим значением энергии. Если заряд ядра не более 10, т. е. в оболочке атома содержится не более 10 электронов, то все остальные электроны смогут расположиться в слое L, вмещающем до восьми электронов. Если же число электронов в оболочке атома больше 10 (заряд ядра больше 10), то часть электронов, кроме слоёв K и L, будет располагаться в слое M, вмещающем 18 электронов, затем в слое N и т. д.

То обстоятельство, что во внутренних слоях (в которых электроны обладают меньшей энергией) может находиться ограниченное количество электронов, и обусловливает периодичность в химических свойствах элементов. По мере заполнения слоёв электроны будут периодически располагаться на внешних слоях. Сходство внешних электронных слоёв атомов определяет подобие в химических свойствах элементов.

Обратимся снова к таблице Менделеева. Первый элемент, находящийся в ней,— водород, второй — гелий. Атомный номер гелия — два. Заряд ядер его атомов также равен двум. В электронной оболочке гелия — два электрона; они находятся в K-слое, заполняя его полностью. Атомы с заполненной оболочкой особенно устойчивы. Гелий — благородный газ, инертный в химическом отношении. Следующим за гелием в таблице Менделеева стоит элемент литий. Атомный номер его равен трём. У него в электронной оболочке — три электрона: два из них находятся в слое K, а один располагается в слое L. Этот единственный электрон в слое L обладает значительно большей энергией, чем электроны, находящиеся в слое K. Для его удаления из атома требуется значительно меньшая энергия. По этой причине атом лития сравнительно легко отдаёт свой электрон из слоя L, вступая при этом в соединение с различными атомами. Способность лития легко отдавать свой наружный электрон и характеризует его в химическом отношении. Литий принадлежит к группе щелочных металлов. Следующие за литием элементы бериллий, бор, углерод имеют соответственно два, три, четыре электрона в слое L. Число этих электронов определяет химическую валентность элементов. У десятого по порядку элемента — неона — будут заполнены и K- и L-оболочки. Группа из восьми электронов является особенно устойчивой. В соответствии с этим неон является благородным газом. За неоном в таблице Менделеева стоит натрий. Атомный номер его — одиннадцать. В оболочке его атомов содержатся одиннадцать электронов. Два из них заполняют слой K, восемь — слой L, а одиннадцатый находится в слое M. У натрия, так же как и у лития, во внешнем слое имеется один слабо связанный электрон. Этим и объясняется сходство химических свойств натрия и лития. Натрий, как и литий, является щелочным

металлом, способным легко отдавать свой слабо связанный внешний электрон.

Теория Бора, разъяснившая причину периодичности в химических свойствах элементов, указала вместе с тем на новую возможность определения заряда ядра у каждого элемента. Это определение было произведено Мозели. Чтобы понять идею этих измерений, мы ещё раз обратимся к слоям K, L, M и т. д., в которых располагаются электроны, составляющие оболочку атома. Как мы уже упоминали, для удаления электронов из этих оболочек нужно затратить энергию, соответственно равную W_K, W_L, W_N и т. д. Эту энергию можно сообщить электронам, если подействовать на атом какой-нибудь внешней силой, например, ударом электрона или альфа-частицы. Если действующая сила будет достаточно велика, электрон будет удалён из соответствующей оболочки; атом, следовательно, будет ионизирован. Однако воздействие на атом может оказаться и не столь сильным. Электрон слоя K получит при этом энергию меньшую, чем W_K. Для удаления электрона из атома этой энергии недостаточно, но она может оказаться достаточной, чтобы перебросить электрон, например из слоя K в слой L (если он не заполнен) или в слой M. Такой атом, у которого электрон переброшен из слоя, где он нормально находится, в наружный слой, будет нейтрален; он не будет ионом, однако он будет отличаться от остальных нормальных атомов этого химического элемента, так как у него имеется избыток энергии. Атомы, обладающие избытком энергии, принято называть возбуждёнными. Итак, атомы кроме нормального и ионизированного состояний могут еще находиться в возбуждённых состояниях. Обозначим энергию нормального атома через W_0, а энергию возбуждённого атома через W'.

Что же будет происходить с возбуждённым атомом? Мы уже знаем, что ионизированный атом, т. е. атом, лишённый электрона, имеет тенденцию превратиться снова в нормальный атом. Для этого ему необходимо захватить извне свободный электрон. Возбуждённому атому не нужно ничего захватывать, ибо при возбуждении меняется только энергия какого-либо из электронов оболочки, число же электронов в ней остаётся без изменения. Естественно, что такой атом может вернуться в нормальное состояние скорее, чем ионизированный. Спрашивается, что же будет при этом с избытком

энергии $W'-W_0$, который был у атома в возбуждённом состоянии.

На этот вопрос Бор дал следующий ответ: *атом, переходящий из возбуждённого состояния в нормальное, излучает некоторую порцию световой энергии* (равную энергии возбуждения). Эту порцию световой энергии принято называть *квантом* света. Какой же свет при этом излучается?

Мы знаем, что существует множество цветов видимого света: красный, синий, зелёный и т. д. Мы знаем также о существовании невидимых лучей — инфракрасных, ультрафиолетовых и рентгеновских.

Все эти различные лучи имеют совершенно одинаковую природу; все они представляют собой электромагнитные волны и отличаются друг от друга не более, чем отличаются между собой различные музыкальные ноты.

Все различные звуки, выражаемые нотами (до, ре, ми и т. д.), имеют также одинаковую природу. Они представляют собой колебания воздуха и отличаются друг от друга лишь частотой колебаний.

Точно так же и различные световые лучи, как видимые, так и невидимые, отличаются друг от друга лишь частотой электромагнитных колебаний. Частота этих колебаний весьма велика. Так, например, частота колебаний у жёлтых лучей, испускаемых раскалёнными парами натрия, равна $5\cdot10^{14}$ в секунду. Все оттенки видимого света имеют частоты, заключённые в интервале между $4\cdot10^{14}$ и $8\cdot10^{14}$ колебаний в секунду. Частоты колебаний, бóльшие 10^{15} в секунду, соответствуют уже невидимым (ультрафиолетовым) лучам. Невидимы также и лучи, имеющие частоты колебаний меньше $4\cdot10^{14}$ в секунду (инфракрасные лучи). Большой диапазон колебаний от 10^{16} до $3\cdot10^{19}$ колебаний в секунду мы объединяем общим названием — рентгеновские лучи. Кстати, и те гамма-лучи, которые были обнаружены в составе радиоактивного излучения, имеют природу, аналогичную видимому свету. Гамма-лучи — тоже электромагнитные волны, но только их частота еще бóльшая. Частота колебаний гамма-лучей порядка $10^{19}-10^{21}$ колебаний в секунду. Частоту колебаний принято обозначать греческой буквой ν («ню»).

Вернёмся к поставленному выше вопросу — какой же свет будет излучаться при переходе атома из возбуждённого состояния в нормальное?

По теории Бора следует, что частота света, испускаемого при переходе атома из возбуждённого состояния в нормальное, зависит от разности энергии возбуждённого и нормального состояний. Чем больше энергия возбуждения, тем больше будет частота света, излучённого при переходе из возбуждённого состояния в нормальное.

Точное соотношение между частотой ν и энергией возбуждения $W' - W_0$ дано Бором в виде следующей формулы:

$$\nu = \frac{W' - W_0}{h}.$$

Здесь буквой h обозначена постоянная величина, играющая огромную роль в атомной физике и названная постоянной Планка. Постоянная Планка равна $6{,}62 \cdot 10^{-27}$ *эрг·сек*. Величина $h\nu$, представляющая порцию световой энергии, испускаемой одним атомом, и носит (как мы указали выше) название кванта света.

Ещё в XIX столетии было известно, что излучение различных веществ различно. Оказывается, что каждый химический элемент испускает лучи не какого-либо одного определённого вида, а спектр, т. е. излучение сложного состава, содержащего много различных лучей. Однако спектр этих лучей у каждого элемента особый. Это своеобразие спектров различных веществ лучше всего проявляется в газообразном состоянии.

Дальнейшие исследования показали, что характер спектра, излучаемого вследствие возбуждения атомами данного вещества, зависит от величины энергии возбуждения. По мере увеличения энергии возбуждения в спектре излучения появляются новые лучи. Эти новые лучи легко объединяются в группы, которые принято называть сериями. Признак, по которому лучи объединяются в серию, очень прост. Все отдельные лучи одной серии появляются в составе излучения одновременно. Если возбуждение недостаточно, лучей соответствующей серии совершенно нет; если энергия возбуждения больше некоторого граничного значения, то все лучи серии появляются сразу. Пока изучали атомы, сравнительно слабо возбуждённые (например, нагретые до

нескольких тысяч градусов), наблюдали свет, состоящий из световых квантов малой энергии, образующих видимые лучи, инфракрасные лучи и в малом количестве ультрафиолетовые лучи.

Позже, когда научились сообщать атомам бо́льшие возбуждения, смогли наблюдать излучение, содержащее кванты бо́льших энергий. Если, как это обнаружил Рентген, возбуждать атомы электронами, имеющими энергию в несколько десятков тысяч электрон-вольт, то возникают рентгеновские лучи, которые и представляют собой кванты излучения с большой энергией, измеряемой соответственно тоже несколькими десятками тысяч электрон-вольт. Понятно, что для получения квантов излучения столь большой энергии нужно сильно возбудить атом, сообщить ему большую дополнительную энергию.

Это различие в излучении атомов при изменении энергии возбуждения нашло полное объяснение в теории Бора. Причина его заключается в различии в величине энергии, которую имеют электроны, находящиеся в различных слоях. (По теории Бора энергия связи электрона зависит от радиуса его орбиты: она обратно пропорциональна квадрату радиуса орбиты.) Если удалить из атома электрон с одной из внутренних оболочек, то на освободившееся место перейдёт электрон, принадлежавший какой-либо более удалённой от ядра оболочке. При таком переходе и происходит излучение, ибо электроны, расположенные в более удалённых слоях, имеют бо́льшую энергию. Рентгеновские лучи возникают при переходе электронов в наиболее близкие к ядру слои.

Изучение рентгеновского излучения и стало предметом работы Мозели. Особенное внимание его привлекла серия K, образующаяся в результате переходов электронов из различных слоёв в слой K и, в частности, линия, носящая название K-альфа (её принято обозначать K_α). Эта линия излучается при переходе электрона из группы L в группу K (см. рис. 10) и является самой интенсивной линией серии K.

Интерес Мозели к излучению K-серии и, в частности, линии K_α понять нетрудно. Он проистекает оттого, что при возбуждении K-серии приходится удалять из атома электроны, наиболее близко расположенные к атомному ядру и, следовательно, наиболее сильно притягиваемые им. К тому же K-электроны испытывают притяжение к атомному ядру,

не ослабленное действием других электронов. Естественно поэтому, что влияние заряда ядра на движение таких электронов будет сказываться наиболее сильно. Бор, рассмотревший теоретически этот вопрос, показал, что частота излучения линии K_α зависит от величины заряда атомного ядра следующим образом:

$$\nu = R(Z-1)^2, \quad (6)$$

где Z обозначает, как всегда, величину заряда ядра в элементарных единицах, а буквой R обозначена некоторая постоянная величина, часто *встречающаяся* в теории излучения и равная $3{,}29 \cdot 10^{-15}$ сек.$^{-1}$.

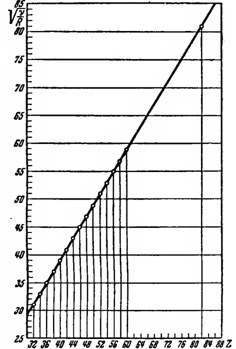


Рис. 11. Зависимость частоты линии K_α от атомного номера. По оси абсцисс отложен атомный номер, по оси ординат — корень квадратный из частоты, делённой на постоянную величину R.

Формула (6) показывает, что частота линии K_α, *принадлежащей* K-серии рентгеновских лучей, связана с интересующей нас величиной заряда атомного ядра. Можно было ожидать, что измерение частоты K_α поможет нам в определении величины заряда атомных ядер. Поэтому Мозели и решил измерить частоту линии K_α у различных элементов. Большая работа, проведённая им, привела к очень важному результату. Оказалось, что частота рентгеновских лучей меняется при переходе от элемента к элементу вполне

закономерным образом в полном согласии с формулой (6). Сравнение с этой формулой удобно производить, если результаты измерений изобразить в виде графика, откладывая на одной оси значения $\sqrt{\frac{\nu}{R}}$, а на другой — величину атомного номера Z. Такой график представлен на рис. 11.

Из этого графика хорошо видно, что корень квадратный из частоты K_α-линий рентгеновских лучей меняется линейно с атомным номером. Этот факт в сопоставлении с формулой (6) означает, что атомный номер элемента связан с зарядом ядра и изменяется так же, как и заряд ядра. Этот замечательный результат имеет двоякое значение. С одной стороны, он является обоснованием теории атома Бора, базирующейся на ядерной модели Резерфорда, следовательно, служит дополнительным подтверждением этой модели. С другой стороны, он даёт нам возможность измерять заряды атомных ядер. Для этого согласно формуле (6) нужно определить частоту линии K_α исследуемого элемента и разделить её на постоянную R, а затем извлечь из отношения квадратный корень и прибавить к полученному результату единицу. Найденное число и будет представлять собой величину заряда ядра.

Измерения Мозели показали, что заряд ядра атомов различных элементов с большой точностью совпадает с величиной атомного номера. Так ещё раз подтвердилась изложенная выше гипотеза.

В итоге большой работы, проведённой многими учёными, мы получили несомненное доказательство того, что атомы состоят из атомных ядер и электронной оболочки. Атомы различных элементов отличаются друг от друга величиной заряда ядра и числом электронов в оболочке атома. Эти же работы показали, что элементы в таблице Менделеева располагаются в порядке возрастания величины заряда их ядер, причём у двух соседних элементов разница в величине заряда ядра равна единице.

Существование атомных ядер перестало быть гипотезой. Оно стало научной истиной.

ГЛАВА III

МАССА АТОМНЫХ ЯДЕР

Опыты, описанные в предыдущей главе, доказали существование атомных ядер и вместе с тем установили два фундаментальных их свойства.

1. Величина заряда ядра оказалась равной атомному номеру элемента.

2. Масса атомного ядра оказалась по величине близкой к массе всего атома.

Однако в упомянутых выше опытах измерение массы атомных ядер непосредственно не производилось, и о ней можно было иметь лишь некоторое суждение на основании косвенных данных. Между тем после заряда масса является наиболее существенной характеристикой ядра. Поэтому возникла задача измерения массы атомных ядер с возможно большей точностью. Конечно, измерить непосредственно массу ядра трудно. Ведь для этого надо было бы удалить из атома электроны. Сделать это можно только в редких случаях (например, у водорода и гелия, где число электронов незначительно). Поэтому приходится довольствоваться установлением массы не атомного ядра, а всего атома в целом. Поскольку мы сравнительно хорошо знаем как величину массы отдельного электрона, так и общее число электронов в атоме, мы можем, исключив массу всех электронов из общей массы атома, установить значение массы его атомного ядра.

Как измеряют массу атома

Для установления массы атомного ядра достаточно измерить массу отдельного атома. Но как это сделать? Наиболее простым способом было бы взвешивание достаточно большого, но хорошо известного числа атомов. Таким способом

обычно и пользовались ранее при определении массы атомов. Было известно, что в одном грамм-атоме любого вещества содержится $N=6\cdot10^{23}$ атомов. В то же время в одном грамм-атоме содержится столько граммов веса, сколько единиц заключено в атомном весе данного элемента. Следовательно, масса одного атома равна $\frac{A}{N}$ (где A — атомный вес). Значит, определение массы отдельного атома может быть сведено к измерению атомного веса.

Методы определения атомного веса были разработаны давно. Принимая атомный вес кислорода равным 16 и установив на опыте весовые количества кислорода и данного элемента, вступающие между собой в реакцию, можно вычислить атомный вес элемента.

Условимся выражать массу атома не в граммах, а в условных единицах массы, в которых масса атома кислорода будет равна 16. В этих единицах масса атома и атомный вес выражаются одним и тем же числом. Во всём дальнейшем изложении мы будем выражать величину массы атома именно в этих единицах (выбранная нами единица массы равна $1{,}66\cdot10^{-24}$ *г*).

Связь между атомным весом и массой атома и была использована в первоначальных определениях массы атома. Однако такое определение массы атома не удовлетворяло учёных. Во-первых, точность измерения атомных весов была не очень велика, во-вторых, число атомов в одном грамм-атоме было известно с недостаточной точностью, и, наконец, что самое существенное, не было доказано, что массы всех атомов данного элемента одинаковы. Более того, изучение радиоактивных веществ и продуктов их превращений показало, что существуют изотопы — атомы, имеющие одинаковые химические свойства, но различающиеся по своей массе. Изотопы существуют не только у радиоактивных элементов. Было установлено наличие изотопов у стабильного (устойчивого) элемента свинца. Можно было ожидать, что и другие стабильные элементы также состоят из изотопов. Однако для выяснения этого вопроса надо было найти способы непосредственного измерения массы отдельных атомов.

Разделение изотопов неона

Для определення массы отдельных атомов Томсон воспользовался опнсанным выше электромагнитным способом определення отношення заряда частнцы к её массе. Зная велнчнну заряда нона н определяя отношенне велнчнны заряда к массе нона, можно вычислить массу отдельного иона, а следовательно, н атома. Определенне отношення заряда к массе основывается на разлнчни в действни, оказываемом на движущнйся нон электрнческнм н магннтным полямн.

Еслн поставнть на путн пучка нонов, прошедшего совпадающне по направленню электрнческое н магннтное поля *), фотографнческую пластннку, на которой отпечатывался бы след места встречн нонов с фотопластинкой, то мы должны были бы получнть на этой фотопластннке некоторую крнвую лннню, положение которой завнсело бы от массы нона. Напомннм, что отклонение иона под действнем электрического поля E равно

$$s_E = \frac{e}{m} E \frac{l^2}{2u^2}, \tag{1}$$

а под действнем магннтного поля H

$$s_H = \frac{e}{m} H \frac{l^2}{2u}, \tag{2}$$

где e — заряд нона, m — его масса, а l — расстоянне, на котором происходнт отклоненне.

Пусть отклоненне под действнем электрнческого поля будет направлено вертикально снизу вверх (рнс. 12), а отклоненне под действнем магннтного поля — горнзонтально слева направо. Для всех нонов, масса которых одинакова, отклоненне будет завнсеть только от скоростн нонов. Однако эта завнснмость для отклонення в электрнческом и магннтном полях различна. Еслн, например, скорость нонов будет в два раза меньше, то нон после прохождення электрнческого и магннтного полей отклоннтся вверх (действие электрнческого поля) сильнее в четыре раза, а вправо (действне магнитного поля) — только в два раза.

*) При одннаковом направлении электрнческого и магнитного полей снлы действия нх иа движущнйся заряд будут взанмно перпеидикулярны.

В том случае, когда через магнитное и электрическое поля проходит пучок ионов, различных по своим скоростям, ионы различных скоростей встретят фотографическую пластинку в ряде точек, расположенных на одной кривой (рис. 12).

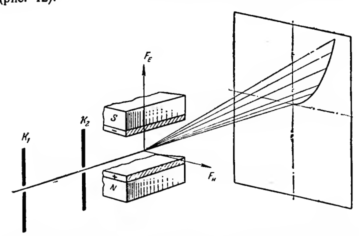


Рис. 12. Схема развёртки электрическим и магнитным полями пучка ионов с различными скоростями в параболу. Сила действия электрического поля обозначена F_E, сила действия магнитного поля F_H, K_1 и K_2 — диафрагмы, ограничивающие пучок.

Анализируя соотношение электрического и магнитного отклонений, Томсон показал, что ионы определённой массы и заряда, но обладающие разными скоростями, располагаются вдоль кривой, называемой параболой. Сколько будет в пучке ионов, имеющих различные массы или заряды, столько получится различных парабол. По наименованию этих кривых метод, предложенный Томсоном, получил название «метода парабол».

Для первых опытов был выбран элемент неон. Прибор, в котором происходило взвешивание неоновых ионов, схематически изображён на рис. 13.

В стеклянном шаровом баллоне A имелись два электрода B и D, с помощью которых можно было возбуждать в баллоне электрический разряд. Для того чтобы разряд мог возникнуть, необходимо было удалить из баллона воздух, что

осуществлялось с помощью патрубка F, соединяющего баллон A с системой вакуумных насосов. Для получения неоновых ионов в сосуд A через капиллярную трубочку E вводился неон. Давление неона в баллоне A регулировалось, с одной стороны, скоростью его натекания через капиллярную трубочку, а с другой стороны — скоростью откачки газа вакуумными насосами. Подобрав надлежащее соотношение скоростей обоих процессов, можно было добиться в баллоне A необходимой для разряда степени разрежения неона.

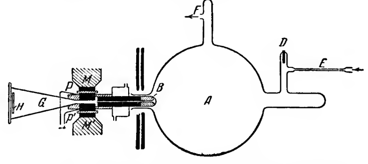


Рис. 13. Схема спектрографа масс, сконструированного Томсоном.

К электроду B присоединялся отрицательный полюс, а к электроду D — положительный. В результате этого поток положительных ионов, образовавшихся при разряде, должен был направляться от электрода D к электроду B. В электроде B был просверлен канал, сквозь который некоторая доля ионов могла проходить в другую часть прибора в виде тонкого луча. Здесь они попадали в пространство между полюсами сильного электромагнита. На полюсные наконечники электромагнита M и M' накладывались пластины P и P' (соответствующим образом изолированные), между которыми создавалось электрическое поле. Так как пластины P, P' были параллельны полюсным поверхностям MM', то магнитное и электрическое поля оказывались одинаково направленными (так же, как это показано на схеме, приведённой на рис. 12).

Отклонённый магнитным и электрическим полями пучок ионов проходил в часть прибора, обозначенную на рис. 13

буквой G, где он встречал фотографическую пластинку H, поставленную перпендикулярно к оси канала, просверленного в электроде B.

То, что при этих опытах получилось на фотографической пластинке, представлено на рис. X в конце книги.

Вид этого рисунка ясно показывает, что пучок ионов, прошедших канал B, был неоднороден, в результате чего получилась не одна парабола, а несколько. Томсон после тщательного анализа разобрал все полученные следы, нашёл параметры этих парабол и по найденным параметрам определил отношение $\frac{e}{m}$, а из этого отношения и массу ионов.

При этом он получил следующие значения масс: 200, 100, 44, 28, 22, 20. Попробуем разобраться в этих числах. Какое, например, вещество представляют ионы с массой 200?

Заглянув в таблицу Менделеева, помещённую в конце этой книги, мы легко найдём ответ на поставленный вопрос. В этой таблице в клеточке номер 80 находится элемент ртуть с атомным весом 200,61. Естественно массу в 200 приписать атомам ртути. Это тем более естественно, что в разрядной трубке должны были находиться пары ртути, попадавшие туда из ртутных насосов, применявшихся для откачки газа. Наряду с парами ртути нужно было ожидать наличия окислов углерода. Последние попадали в разрядную трубку из смазки, применявшейся для вакуумного уплотнения. Массы 44 и 28 соответствуют ионам окислов углерода. Масса 44 — это ионы углекислого газа CO_2^+, а масса 28 принадлежит ионам окиси углерода CO^+. Масса в 100 единиц была приписана ионам ртути, заряженным двукратно. В самом деле, отношение e'/m при удвоенном заряде $e' = 2e$ будет такое же, как отношение однозарядного иона к вдвое меньшей массе:

$$\frac{e'}{m} = \frac{2e}{m} = \frac{e}{\frac{m}{2}}.$$

Ионы с массой в 20 должны быть ионами неона, хотя атомный вес неона в действительности несколько больше, именно, 20,183. Что же такое ионы с массой 22?

Элемента с таким атомным весом в таблице Менделеева нет. Томсон предположил, что ионы с массой 22 тоже принадлежат неону и что, следовательно, существует не один,

а два сорта неона. Атомы одного сорта имеют массу, равную двадцати, атомы другого — двадцати двум единицам. В последующем более тщательные измерения показали, что существует, правда, в очень малом количестве, ещё и третий изотоп неона с массой 21.

Атомный вес неона равен 20,183. По Томсону, это число представляет средний вес смеси двух (в действительности трёх) изотопов неона. Замечательно, что по измерениям Томсона атомный вес обоих изотопов выражается целым числом — 20 и 22. Чтобы из массы таких изотопов получить средний атомный вес 20,183, достаточно допустить, что в смеси содержится 91% изотопа с массой 20 и 9% изотопа с массой 22.

Более тщательные измерения, произведённые несколько позднее, установили следующий изотопный состав неона:

$$^{20}\mathrm{Ne} \ldots 90{,}51\%,$$
$$^{21}\mathrm{Ne} \ldots 0{,}28\%,$$
$$^{22}\mathrm{Ne} \ldots 9{,}21\%$$

(здесь индекс у химического символа Ne означает массовое число изотопа).

В будущем будем называть изотопным весом тот атомный вес, который имел бы элемент, если бы он состоял не из смеси изотопов (как это в действительности имеет место), а только из данного изотопа.

Из своей работы Томсон сделал два важных вывода:

1. Элемент неон (а возможно, и другие химические элементы) представляет собой смесь изотопов.

2. Изотопные веса выражаются числами, очень близкими к целым.

Ко второму выводу мы ещё вернёмся, а сейчас займёмся другими опытами, которые подтвердили первый из выводов Томсона.

Если этот вывод верен и неон действительно состоит из смеси изотопов с атомным весом 20 и 22, то почему атомный вес элемента является величиной постоянной? Ведь атомный вес зависит от соотношения изотопов в смеси, и всякое изменение этого соотношения должно изменить и атомный вес элемента. Может быть, однако, атомный вес не точно постоянная величина? Нет, тщательные измерения,

проведённые для исследования этого вопроса, показали, что всюду на земле атомный вес элементов один и тот же, откуда бы эти элементы ни были добыты. Этот результат, однако, не противоречит предположению о том, что элементы состоят из изотопов, ибо постоянство атомного веса могло означать, что условия образования элементов из изотопов на всей земной поверхности были одинаковы. Чтобы убедиться в правильности утверждения о том, что химический элемент состоит из смеси изотопов, и в том, что, в частности, неон с атомным весом 20 и неон с атомным весом 22 существуют, нужно было эти изотопы отделить друг от друга или по крайней мере изменить их соотношение. Изменение соотношения изотопов в смеси изменило бы средний атомный вес.

Но как изменить соотношение изотопов в смеси?

Химические элементы мы отделяем друг от друга сравнительно легко, пользуясь их различным поведением в различных химических реакциях. Но ведь изотопы реагируют со всеми веществами одинаково, и отделить их друг от друга химическими способами нельзя. Правда, аналогичная задача стояла уже однажды перед учёными. Это была задача отделения друг от друга различных благородных газов. Нужно было разделить на составные элементы смесь благородных газов — аргона, криптона и ксенона. Химические свойства этих газов близки друг другу, поэтому чисто химическими методами нельзя было разделить эти газы. Пришлось для разделения прибегнуть к различию в физических свойствах этих элементов, в частности, к различию в атомном весе. Но ведь атомный вес аргона 39,9, атомный вес криптона 83,7, а ксенона 131,3. Различие в атомных весах у них весьма значительное. Криптон в два раза тяжелее аргона, а ксенон более чем в три раза, и всё же, несмотря на такое большое различие в атомных весах, задача разделения благородных газов оказалась весьма нелёгкой.

Различие в атомных весах обоих изотопов неона небольшое: всего лишь на две единицы отличаются они по весу друг от друга. Тем не менее Астон отважился применить к разделению изотопов тот же метод диффузии, которым пользовались при отделении друг от друга благородных газов. Идея метода диффузии весьма проста.

Известно, что все газы обладают большей или меньшей способностью просачиваться сквозь глиняную стенку. Про-

исходит это потому, что молекулы в газе движутся во всех направлениях и часть этих молекул имеет возможность проникнуть сквозь поры глиняной перегородки. Бо́льшая или меньшая способность просачивания обусловлена различием в массе атомов (или молекул) газа. Чем больше масса атомов, тем меньше средняя скорость их, ибо средняя кинетическая энергия всех молекул газа одинакова; она зависит только от температуры и не зависит от рода газа. Следовательно, газ, состоящий из более тяжёлых молекул, будет просачиваться через глиняную перегородку медленнее, чем газ, состоящий из более лёгких молекул. Если взять некоторое количество неоднородного газа и дать возможность половине газа просочиться через глиняную стенку, то в той части газа, которая просочилась, будет несколько больше более лёгкого газа, а в той части, которая осталась, будет несколько больше тяжёлого газа.

Таким способом и воспользовался Астон. Он взял около ста кубических сантиметров чистого неона и подверг его диффузионной фракционировке, т. е. разделению взятого газа на две различные части, происходящему благодаря тому, что лёгкие молекулы диффундируют сквозь глиняную перегородку быстрее тяжёлых. Из взятой порции газа образовались две порции, в одной из которых было больше, чем обычно, лёгкого изотопа ^{20}Ne, а в другой — несколько больше тяжёлого изотопа ^{22}Ne. Как принято говорить, в результате диффузии образуются две фракции, одна из которых обогащена лёгким изотопом, а другая — тяжёлым изотопом. Это обогащение было, однако, очень незначительным, и пришлось операцию диффузии повторить много раз.

В результате многократной фракционировки были получены две фракции по 2—3 *см*^{3} каждая, в которых соотношение изотопов было отлично от нормального. Атомный вес неона одной фракции оказался равным 20,29, а другой 20,15. Следовательно, в первой, более тяжёлой фракции содержалось ^{20}Ne 86%, а ^{22}Ne — 14%. Во второй, более лёгкой фракции процент ^{20}Ne оказался равным 92,5, а ^{22}Ne — 7,5. Итак, диффузия сквозь глину изменила атомный вес химически чистого неона *). Следовательно, неон действительно представляет собой смесь изотопов.

*) В дальнейшем метод диффузии был усовершенствован, и удалось добиться почти полного разделения неона.

Изотопы стабильных элементов

После работ Томсона и Астона стало ясным, что не только радиоактивные элементы состоят из изотопов. Стабильные элементы в этом отношении не отличаются от радиоактивных. Поэтому необходимо было подвергнуть тщательному и систематическому исследованию все известные элементы. Эта кропотливая и большая задача решалась в течение последующих двух десятилетий (1913—1937 гг.) рядом учёных, которые внесли значительные изменения в метод парабол, сделав его необычайно чувствительным и точным. На рис. XI в конце книги приведены масс-спектрограммы Астона ряда веществ. Скрупулёзный анализ изотопного состава ряда элементов продолжается и поныне.

В таблице IV приведены данные, характеризующие изотопный состав некоторых элементов. В ней даны массовые числа изотопов (столбец 5) и их процентное содержание (столбец 6). Атомный вес элемента указан в столбце 4 таблицы. В столбце 7 приведено значение атомного веса, вычисленное на основании данных об изотопном составе. Как показывает сопоставление столбцов 4 и 7, согласие между вычисленными и измеренными значениями хорошее.

Бóльшая часть химических элементов имеет сложный изотопный состав. Например, олово имеет десять изотопов. Лишь небольшое число элементов состоит только из одного изотопа. К числу таких элементов относятся бериллий с атомным весом 9, фтор с атомным весом 19, натрий с атомным весом 23, алюминий — 27, фосфор — 31, скандий — 45, ванадий — 51, марганец — 55, кобальт — 59, мышьяк — 75, иттрий — 89, ниобий — 93, родий — 103, иод — 127, цезий — 133, лантан — 139, празеодим — 141, тербий — 159, гольмий — 165, тулий — 169, тантал — 181, золото — 197, висмут — 209.

Замечательно, что атомные веса всех этих элементов, состоящих только из одного изотопа, выражаются почти точно целыми числами. Это целое число, характеризующее массу атомов изотопов, называют массовым числом. Все же другие элементы, атомные веса которых выражаются не целыми числами, оказались состоящими из смеси изотопов,

Таблица IV

Изотопный состав некоторых элементов

Атомный номер	Элемент	Символ	Атомный вес	Массовое число изотопа	Содержание изотопа, %	Атомный вес (вычисленный)
1	2	3	4	5	6	7
1	Водород . . .	H	1,008	1 2	99,986 0,014	1,0001
3	Литий	Li	6,940	6 7	7,39 92,61	6,926
7	Азот	N	14,008	14 15	99,62 0,38	14,003
10	Неон	Ne	20,183	20 21 22	90,51 0,28 9,21	20,187
11	Натрий	Na	22,997	23	100	—
17	Хлор	Cl	35,457	35 37	75,43 24,57	35,491
26	Железо	Fe	55,85	54 56 57 58	5,81 91,64 2,21 0,34	55,911
29	Медь	Cu	63,57	63 65	69,04 30,96	63,619
38	Стронций . . .	Sr	87,63	84 86 87 88	0,55 9,75 6,96 82,74	87,713
50	Олово	Sn	118,70	112 114 115 116 117 118 119 120 122 124	0,9 0,61 0,35 14,07 7,54 23,98 8,62 33,03 4,79 6,11	118,86

каждый из которых обладает целочисленным атомным весом. Это — фундаментальный результат, важность которого мы легко поймём из дальнейшего.

Гипотеза Проута

Перенесёмся мысленно в далёкие времена начала XIX столетия, когда атомные веса были измерены очень грубо, да и то лишь для немногих элементов. В это время (1816 г.) Проут обратил внимание на то, что известные тогда атомные веса, измеренные Дальтоном, выражались целыми числами, и высказал гипотезу, что все элементы состоят из атомов водорода в количестве, соответствующем их атомному весу.

Гипотеза Проута была вскоре оставлена. Оказалось, что измерения Дальтона были ошибочны и действительные атомные веса многих элементов очень сильно отличаются от целых чисел. Примером могут служить хлор, атомный вес которого оказался равным 35,45, магний, атомный вес которого 24,32, никель (атомный вес 58,69), цинк (атомный вес 65,38) и др.

Когда же исследования Томсона, Астона и других учёных показали что атомные веса изотопов всех элементов действительно целочисленны, и выяснилось, что причина отступления средних атомных весов от целочисленного значения лежит в существовании изотопов, гипотеза о том, что все элементы построены из водорода, вновь возродилась. Конечно, не могло быть и речи о принятии этой гипотезы в том виде, в котором она была сформулирована самим Проутом. Уровень наших знаний об атомах весьма сильно изменился за те сто лет, которые протекли с момента возникновения этой гипотезы. Ко времени окончания работы Астона ядерная модель атома получила достаточное опытное подтверждение и стала общепринятой. Если стать на точку зрения Проута и считать, что целочисленность атомных весов означает, что химические элементы строятся из более простых элементов, в частности из водорода, то можно высказать следующие предположения:

1. Простейшим атомным ядром является ядро атома водорода.

2. Ядра всех остальных элементов построены из водородных ядер, в силу чего массы ядер (а следовательно, и атом-

ные веса элементов) должны быть кратными массе водородного ядра.

В силу положения, которое в этой системе занимает ядро атома водорода, ему было присвоено особое название — «протон», что значит простейший.

Итак, ядра всех атомов построены из протонов. Однако совершенно очевидно, что такая гипотеза недостаточна. В самом деле, обратимся снова к таблице Менделеева. В ней за водородом следует гелий. Атомный вес его 4. Следовательно, ядро гелия должно состоять из четырёх протонов. Но протон (ядро водорода) заряжен положительно. Величина его заряда численно равна заряду электрона, т. е. элементарной единице, поэтому ядро гелия должно иметь заряд, равный четырём элементарным единицам. Между тем атомный номер гелия (т. е. место его в таблице Менделеева) равен двум, значит, и заряд его ядра должен быть равен не четырём, а двум элементарным единицам. Или, например, другой элемент — алюминий — имеет атомный вес 27, следовательно, его атомное ядро должно содержать двадцать семь протонов, но тогда и заряд этого ядра должен быть равен двадцати семи элементарным единицам, между тем в действительности атомный номер алюминия, а следовательно, и заряд его ядра, равен тринадцати. Такая неувязка получается и для всех остальных элементов таблицы Менделеева.

Ясно, что сформулированной выше гипотезы недостаточно и она нуждается в дополнении. Было предположено, что в атомных ядрах, кроме протонов, содержатся ещё и электроны. Наличие электронов, обладающих отрицательным зарядом, естественно уменьшает тот положительный заряд, который создают протоны, находящиеся в атомном ядре. Полный заряд атомного ядра будет, следовательно, меньше чем суммарный заряд всех заключённых в ядре протонов. Легко сообразить, какое число протонов и электронов должно быть в ядре, чтобы его масса и заряд имели правильное значение.

Пусть атомный вес изотопа будет A, а атомный номер и, следовательно, заряд ядра — Z. Если атомный вес A, то в ядре находится A протонов, т. е.

$$N_p = A,$$

где N_p означает число протонов. Если заряд ядра Z, то

должно выполняться следующее соотношение:

$$Z = N_p - N_e; \quad N_e = A - Z,$$

где N_e — число электронов в атомном ядре. На основе этих предположений можно было сформулировать следующее представление об атомных ядрах: все атомные ядра состоят из протонов и электронов. Число протонов равно массовому числу изотопа, а число электронов — разности между массовым числом и атомным номером.

Трудно указать другую гипотезу, которая получила бы столь быстрое и всеобщее признание. После открытия изотопов и установления целочисленности атомных весов эта гипотеза казалась столь естественной, что её высказали сразу очень многие физики. Ядро атома не могло быть простой системой. Самый факт существования радиоактивности указывал на то, что ядра атомов — сложные системы, и конечно, проще всего было думать, что они состоят из протонов и электронов. Однако в дальнейшем эту гипотезу пришлось оставить.

Энергия связи ядер

Из сказанного ясно, какое большое значение приобрело знание изотопного состава и численных значений атомных и изотопных весов. Естественно, возникло стремление определить эти важные величины с возможно большей точностью.

Особенно интенсивно измерение изотопного состава и атомных весов производилось с 1930 по 1940 г., когда ряду учёных удалось значительно усовершенствовать метод отклонения в электрическом и магнитном полях.

Мы не можем здесь останавливаться на деталях этой интересной и поучительной работы физиков. Для иллюстрации достигнутых результатов в таблице V приведены атомные веса некоторых изотопов. Напомним только при этом, что атомные веса вычисляются по отношению к кислороду, т. е. атомный вес изотопа «кислород шестнадцать» принимается точно равным 16 единицам *). В таблице V наряду со значением атомных весов приведена и величина

*) Есть две шкалы атомных весов: «физическая» шкала, в которой за 16 единиц принят атомный вес изотопа кислорода 16, и «химическая» шкала, в которой за 16 единиц принят атомный вес элемента кислорода.

погрешности этого определения. Как видно из приведённой таблицы, точность, которой удалось достичь при определении массы атома (напомним, что при выбранной нами единице массы масса атома и атомный вес выражаются одним и тем же числом), оказалась весьма значительной, порядка нескольких десятитысячных долей процента. Такая точность в измерениях массы атомов привела к установлению некоторых важных соотношений.

Отметим прежде всего, что в принятых нами единицах атомный вес водорода оказался не точно равен единице, а несколько (на восемь тысячных) больше её. Значения атомных весов и у других элементов также несколько отличаются от целых чисел. Поскольку мы приняли, что:

1) атомы всех веществ состоят из протонов и электронов, причём если A есть ближайшее к атомному весу целое число (массовое число), то в атоме находятся A протонов и A электронов, из которых Z электронов образуют электронную оболочку, а $A—Z$ электронов входят в атомное ядро;

2) атомный вес водорода не точно равен единице, то атомный вес элементов и не должен был бы быть точно целочисленным. Он должен быть только в A раз больше, чем атомный вес водорода. В действительности это оказалось не так.

Обратимся к таблице V, в которой приведены атомные веса некоторых изотопов (изотопные веса). Возьмём для примера гелий. Атомный номер гелия 2, атомный вес близок к четырём единицам. Следовательно, гелий состоит из четырёх протонов и четырёх электронов (два электрона в ядре, два в оболочке). В вес атома входит вес четырёх протонов и четырёх электронов. Но вес одного протона и одного электрона равен атомному весу водорода, поэтому мы должны ожидать, что атомный вес гелия должен быть точно в четыре раза больше атомного веса водорода. Однако учетверённый атомный вес водорода равен 4,03252, в то время как атомный вес гелия равен 4,00386, т. е. меньше учетверённого атомного веса водорода на 0,02866. Эта разница в атомных весах значительно превосходит ошибку измерения, которая в данном случае составляет всего лишь 0,00003.

Итак, *атомный вес гелия не точно равен учетверённому атомному весу водорода, а несколько меньше его.*

В чём же дело?

Таблица V. Атомные веса некоторых изотопов

Название элемента	Символ изотопа	Атомный вес
1	2	3
Водород	$^{1}_{1}H$	1,008131 ± 0,0000033
	$^{2}_{1}D$	2,014725 ± 0,0000064
Гелий	$^{4}_{2}He$	4,003860 ± 0,000031
Литий	$^{6}_{3}Li$	6,016917 ± 0,000051
	$^{7}_{3}Li$	7,018163 ± 0,000057
Бериллий	$^{9}_{4}Be$	9,014958 ± 0,000062
Бор	$^{10}_{5}B$	10,016169 ± 0,000070
	$^{11}_{5}B$	11,012901 ± 0,000050
Углерод	$^{12}_{6}C$	12,003880 ± 0,000025
	$^{13}_{6}C$	13,007561 ± 0,000043
Азот	$^{14}_{7}N$	14,007530 ± 0,000016
	$^{15}_{7}N$	15,004870 ± 0,000072
Кислород	$^{16}_{8}O$	16,000000
	$^{17}_{8}O$	17,00450 ± 0,000060
	$^{18}_{8}O$	18,00485 ± 0,00018
Неон	$^{20}_{10}Ne$	19,99889 ± 0,000061
Натрий	$^{23}_{11}Na$	22,99644 ± 0,00018
Алюминий	$^{27}_{13}Al$	26,99069 ± 0,00043
Кремний	$^{30}_{14}Si$	29,98290 ± 0,00015
Сера	$^{32}_{16}S$	31,98252 ± 0,00026
Хлор	$^{35}_{17}Cl$	34,97884 ± 0,00019
Хром	$^{50}_{24}Cr$	49,96020 ± 0,00025
Марганец	$^{55}_{25}Mn$	54,95545 ± 0,00027
Медь	$^{65}_{29}Cu$	64,948884 ± 0,00032
Стронций	$^{86}_{38}Sr$	85,93533 ± 0,00043
Цирконий	$^{90}_{40}Zr$	89,93178 ± 0,00063
Кадмий	$^{110}_{48}Cd$	109,93873 ± 0,00066
Олово	$^{116}_{50}Sn$	115,93779 ± 0,00058
Барий	$^{138}_{56}Ba$	137,9491 ± 0,0011

Продолжение

Название элемента	Символ изотопа	Атомный вес
1	2	3
Гафний	$^{180}_{72}Hf$	180,0004 $\pm$ 0,0014
Платина	$^{194}_{78}Pt$	194,0256 $\pm$ 0,0014
Свинец	$^{208}_{82}Pb$	208,0422 $\pm$ 0,0015

Обратимся к аналогии. Мы хорошо знаем, что вода состоит из водорода и кислорода. Два атома водорода и один атом кислорода, соединяясь вместе, образуют молекулу воды. Однако образование воды никогда не является единственным результатом соединения атомов водорода и кислорода. Известно, что при этом всегда выделяется тепло. Эта теплота реакции, иначе называемая ещё энергией связи молекулы, характеризует силу, связывающую атомы в молекулу. Чем больше теплоты выделяется при образовании молекулы (чем больше энергия связи молекулы), тем прочнее будут связаны между собой атомы и тем труднее разрушить такую молекулу. Совершенно такое же положение вещей должно иметь место и в случае атомных ядер. Атомные ядра — сложные образования. По нашей гипотезе ядро гелия образуется из четырёх протонов и двух электронов. Эти шесть частиц, соединяясь вместе, создают весьма прочное тело — атомное ядро гелия. Раз протоны и электроны образуют прочное соединение, значит, при образовании ядра гелия должно выделиться некоторое количество энергии. Величина этой энергии будет тем больше, чем прочнее образующееся соединение.

При образовании одной грамм-молекулы воды выделяется 68 000 малых калорий. Конечно, ядро гелия неизмеримо прочнее молекулы воды, поэтому естественно ожидать, что при образовании одной грамм-молекулы (или, точнее, грамм-атома) гелия выделится значительно бóльшая энергия.

Какое это, однако, имеет отношение к той разнице в атомных весах гелия и водорода, которую мы обнаружили выше? Оказывается — самое прямое.

Чтобы сделать понятной связь, существующую между теплотой реакции и тем, что атомный вес гелия несколь-

ко меньше учетверённого атомного веса водорода, обратимся к одному довольно широко распространённому заблуждению.

Ещё и теперь иногда определение массы и энергии даётся независимо друг от друга. Масса определяется из законов движения Ньютона (как мера инерции тел) как величина, не зависящая от характера движения (а следовательно, и от скорости). Энергия определяется как способность совершать работу. Это обстоятельство явилось следствием того, что долгое время считали массу и энергию независимыми характеристиками вещества. Считалось, что есть два независимых физических закона. Один — закон сохранения массы, другой — закон сохранения энергии. Однако опыт и теория (теория относительности Эйнштейна) показали, что это не так и что на самом деле масса не является независимой от энергии.

В 1901 г. Кауфман, определяя отношение заряда электрона к его массе, нашёл, что это отношение, постоянное (в пределах точности измерения) для медленно движущихся электронов, начинает меняться, когда скорость электронов приближается к скорости света. Позднее он установил, что найденное им изменение отношения заряда электрона к массе в зависимости от скорости электрона полностью согласуется с выводами теории относительности.

Зависимость массы от скорости, по этой теории, выражается следующим соотношением:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}, \qquad (7)$$

где m_0 — масса, которой обладает тело в покое, m — масса, которую имеет это тело, когда оно движется со скоростью v, а c — скорость света, равная $3 \cdot 10^{10}$ *см/сек.*

При обычных скоростях это изменение массы столь ничтожно, что оно не может быть обнаружено. Возьмём для примера орудийный снаряд. Как известно, орудийный снаряд вылетает из ствола орудия с начальной скоростью порядка 1000 *м/сек.* При такой скорости движения его масса изменится всего лишь на 10^{-11} своей величины. Обнаружить столь малое изменение массы не представляется возможным. Даже если бы снаряд вылетал со скоростью 10 000 *м/сек*,

то и тогда изменение его массы было бы ещё далеко недостаточным для измерения; оно составляло бы всего лишь одну десятимиллионную долю процента. Однако для электронов (катодные лучи), скорость движения которых достигает величин 10^9—10^{10} *см/сек*, изменение массы оказывается уже вполне измеримой величиной. Следовательно, масса не есть величина постоянная, не зависящая от скорости (энергии движения); она зависит от скорости и, очевидно, каким-то образом связана с энергией.

Теория относительности устанавливает эту связь вполне определённым образом. Согласно этой теории соотношение между энергией и массой записывается так:

$$W = mc^2. \qquad (8)$$

В этом соотношении W означает энергию, m — массу, а c — скорость света.

Эта связь между энергией и массой оставалась долгое время необнаруженной потому, что энергии, с которыми до тех пор имели дело, были сравнительно невелики и соответствующие этим значениям энергии массы оказывались очень малыми. Так, например, масса, связанная с тепловой энергией, выделяющейся при сжигании целого эшелона угля, составляет всего лишь около половины грамма. По соотношению (8) одна малая калория соответствует массе в $4{,}67 \cdot 10^{-14}$ *г*. Естественно, что столь малая масса не могла быть замечена.

Именно то обстоятельство, что величины энергии, с которыми мы в течение долгого времени имели дело в нашей «земной практике», были очень малы, и было причиной тому, что связь между массой и энергией ускользала от внимания исследователей. Создалось и укрепилось ложное представление о том, что масса и энергия суть величины независимые, что масса движущегося тела не зависит от его скорости.

По мере углубления знакомства с явлениями, происходящими в атомах и атомных ядрах, мы всё больше и больше соприкасаемся с движениями, совершающимися с большими скоростями, и с энергиями, значительно большими, чем те, что встречаются в нашей обыденной практике. Поэтому здесь мы не должны ни на минуту забывать о той связи, которая существует между массой и энергией.

В свете вышеизложенного становится совершенно ясной причина того, что атомный вес гелия меньше, чем учетверённый атомный вес водорода. Этого, собственно, и следовало ожидать, ибо всё, что мы знаем об атомных ядрах, говорит о том, что воздействовать на них очень трудно. Атомные ядра — очень прочные системы. Следовательно, при их образовании должно *выделяться большое количество энергии*. Если так, то масса системы при её образовании (а с ней и атомный вес) должна заметно уменьшаться. Та разница

$$\Delta A = 4A_{\mathrm{H}} - A_{\mathrm{He}} = 0{,}02866,$$

которую мы нашли, характеризует, следовательно, энергию образования атомных ядер гелия, или, иными словами, энергию связи частиц, образующих это ядро.

Большая ли это энергия?

Пользуясь соотношением (8), мы найдём, что масса в 0,02866 грамма, теряемая при образовании одного грамм-атома гелия, соответствует $6{,}2 \cdot 10^{11}$ малых калорий. Если бы мы вздумали получать эту энергию при сжигании угля, то нам пришлось бы сжечь 5—6 вагонов первосортного донецкого угля, чтобы получить такое количество энергии, которое выделяется при образовании одного грамм-атома (четырёх граммов) гелия. Однако состоит ли в действительности ядро гелия из четырёх протонов и двух электронов?

Позднее мы дадим исчерпывающий ответ на этот вопрос, а сейчас вернёмся опять к вопросу о массе атомных ядер и о разделении изотопов.

Развитие методов анализа атомных весов изотопов дало возможность путём взвешивания отдельных атомов установить не только то, что обычные химические элементы представляют собой смесь изотопов, имеющих различный атомный вес, но и определить этот вес с такой точностью, которая намного превосходила обычные способы определения атомного веса. Столь точное знание массы атомных ядер позволило обнаружить и измерить уменьшение массы ядер, которое возникает вследствие выделения энергии при образовании ядра. Это уменьшение массы характеризует *энергию связи ядер*. Энергия связи является важнейшей физической характеристикой ядра, поэтому понятно то значение, которое имеет всё более и более точное измерение атомных весов изотопов.

Методы разделения изотопов

Обратимся теперь к вопросу о разделении изотопов. Открытие изотопов стабильных (нерадиоактивных) элементов привело к многочисленным попыткам отделения изотопов друг от друга. Мы уже упоминали о способе диффузии, который применил Астон, для того чтобы добиться хотя бы частичного разделения изотопов неона. Мы видели, каких больших трудов это стоило. Пришлось много десятков раз прогонять газ через глиняную перегородку. Процесс перегонки совершался медленно, и степень обогащения была незначительной.

В дальнейшем метод диффузионного разделения был усовершенствован. Были применены высоковакуумные насосы, с помощью которых создавали по одну сторону глиняной перегородки сильное разрежение, чем заметно ускорялся процесс диффузии. С другой стороны, с помощью насосов фракцию, обедневшую одним изотопом, возвращали обратно в систему. Благодаря этому обстоятельству количество газа, подвергавшегося разделению, не уменьшалось. Кроме того, стали применять для диффузии специальные перегородки со значительно большим числом микроотверстий, чем в обычной глиняной перегородке. Это также значительно ускорило процесс диффузии.

Применение большого количества насосов и специальных пористых перегородок, а также создание непрерывно действующей установки настолько улучшили условия отделения изотопов, что из обыкновенного неона, в котором, как мы знаем, находится 9,2% ^{22}Ne, удалось получить две фракции: тяжёлую, в которой ^{22}Ne было в два с половиной раза больше, чем ^{20}Ne, и лёгкую, в которой ^{22}Ne было меньше одного процента. Разница в атомных весах обеих фракций достигла громадной величины —1,4.

Другим способом разделения изотопов, применённым в последнее время с большим успехом, явился метод термодиффузии. Само явление термодиффузии заключается в том, что если в однородной смеси двух газов создана постоянная разность температур, то благодаря возникающим при этом процессам диффузии происходит расслоение этой смеси, в результате чего в холодном месте будет преобладать одна из компонент смеси, а в горячем — другая. Какая из компо-

нент смеси будет преобладать в горячем месте зависит от характера взаимодействия молекул. Чаще всего в холодном месте преобладают тяжёлые молекулы, а в горячем лёгкие, хотя известны некоторые смеси, у которых, наоборот, в горячем месте преобладают тяжёлые молекулы, а в холодном — лёгкие. Это явление и было использовано для разделения изотопов.

Для разделения изотопов можно использовать и другие явления, характер протекания которых зависит от скорости молекул. Можно использовать для этой цели испарение молекул под пониженным давлением, электролиз, центрифугирование и т. д.

Конечно, для разделения изотопов можно применить и метод магнитного и электрического отклонения, которым пользуются для измерения массы. Такой способ хорош тем, что он позволяет сразу отделять один изотоп от другого, а не только увеличивать концентрацию одного из изотопов в смеси.

Разделение изотопов электрическим и магнитным полем было осуществлено, например, у лития, калия и урана. Производительность такого способа была невелика. Один миллиграмм лития удалось получить за сутки. 1,8 микрограмма ^{238}U было получено за 3 часа. Ограничение в производительности разделения изотопов обусловлено тем, что ионный ток не мог быть сделан очень большим. При большой плотности ионов сказывается заметным образом наличие сил отталкивания между ними (напомним, что по закону Кулона одноимённо заряженные частицы отталкиваются друг от друга). Чем больше ионов движется одновременно, тем бо́льшие силы отталкивания возникают между ними. Путь ионов искажается, и разделения изотопов не происходит.

В последнее время, однако, найдены способы устранения этого вредного влияния расталкивания ионов друг другом. Это позволило добиться при помощи магнитного и электрического отклонений весьма эффективного разделения изотопов.

Трудность разделения изотопов заключается в том, что относительное различие в массе изотопов невелико. Так, у неона это различие в массе составляет 5%, у урана около 1%.

Есть, однако, один случай, в котором относительное изменение массы изотопов оказалось весьма значительным. Конечно, в этом случае раньше всего удалось добиться эффективных результатов.

Разделение изотопов водорода

История этого разделения весьма поучительна. В системе атомных весов принято считать атомный вес кислорода равным 16. Атомный вес водорода отличен от единицы. Измерения, произведённые довольно точно различными учёными, дают для атомного веса водорода число 1,00777. Это число не совпадает с измеренным Астоном при помощи масс-спектрографа отношением атомных весов кислорода и водорода.

Именно, по Астону, следует, что отношение веса атома водорода к весу атома кислорода таково, что если вес атома «кислорода шестнадцать» принять за 16 единиц, то вес атома водорода составит 1,00756. Различие между двумя цифрами небольшое — в четвёртом знаке после запятой; тем не менее это было действительным различием, ибо оно выходило за пределы ошибок опыта.

Противоречие между этими различными способами измерения одной и той же величины могло возникнуть потому, что оба метода измеряют не совсем одно и то же. В самом деле, Астон измерял отношение весов кислорода 16 к водороду 1; между тем химики измеряют отношение средних атомных весов кислорода и водорода. Правда, считалось, что ни кислород, ни водород не имеют изотопов, вернее, каждый из них состоит только из одного изотопа. А что, если это не так?

Что, если оба эти изотопа или по крайней мере один из них содержит примесь других изотопов, но в крайне малом количестве?

Обнаружить существование таких изотопов невозможно, следовательно, и нельзя было учесть влияние, оказываемое наличием этого слабого изотопа на средний атомный вес элемента. Поэтому указанное выше противоречие двух измерений могло быть следствием наличия в малых количествах примесей других неизвестных изотопов.

И действительно, ещё в 1929 г. было открыто существование изотопов кислорода с атомным весом 17 и атомным весом 18. Как и ожидалось, содержание этих изотопов оказалось очень малым. На десять тысяч атомов кислорода 16 приходится четыре атома кислорода 17 и двадцать атомов кислорода 18.

Однако открытие существования изотопов у кислорода не устранило отмеченного выше противоречия. Если учесть действительный изотопный состав кислорода и принять, что шестнадцати равен не средний атомный вес его, а вес изотопа кислорода 16, то атомный вес водорода окажется равным не 1,00777, а 1,00799. Поправка от многоизотопности кислорода оказалась маленькой и положение дела не только не исправила, но скорее ухудшила, так как, по данным Астона, атомный вес водорода и без того был меньше, чем по химическим данным, а после исправления стал и подавно меньше. Обратив на это внимание, физики решили, что, вероятно, и водород не является чистым элементом, а состоит из смеси двух или большего числа изотопов. Поскольку химический атомный вес водорода, являющийся средним атомным весом, оказался больше, чем атомный вес водорода 1, который был определён Астоном, то следовало ожидать у водорода примеси более тяжёлых изотопов. Если допустить, что расхождение в атомных весах (химических и измеренных Астоном) обусловлено наличием изотопа водорода с массой два, то для объяснения этого расхождения достаточно было наличия всего лишь 0,2% примеси изотопа водорода с двойным атомным весом. Установив это, физики принялись за поиски тяжёлого водорода. Сначала был применён метод испарения водорода при малом давлении. Испарив значительную часть взятого водорода, подвергли остаток, который должен был быть обогащён тяжёлым изотопом водорода (ибо лёгкий изотоп испарялся в бо́льшем количестве), спектральному исследованию. При этом были обнаружены наряду с линиями, принадлежащими обычному водороду, новые линии, как раз те, которые по расчётам должен был бы испускать водород, если бы масса его была равна не единице, а двум.

Таким образом было доказано, что тяжёлый изотоп водорода, атомный вес которого равен двум, действительно существует.

В дальнейшем тяжёлому изотопу водорода было присвоено специальное наименование «дейтерий». В отличие от лёгкого изотопа водорода, за которым в качестве химического символа сохранена буква Н, дейтерий принято обозначать буквой D. В этих обозначениях формула тяжёлой воды (в молекулах которой оба атома водорода — тяжёлые) будет D_2O. Открытие тяжёлого изотопа водорода сыграло большую роль в изучении атомного ядра. Эта роль будет освещена в дальнейшем.

Не меньшее значение имело открытие дейтерия и для изучения самого явления изотопии, ибо здесь учёные впервые столкнулись с таким случаем, когда масса одного изотопа в два раза больше массы другого, благодаря чему влияние массы на протекание физических явлений в случае изотопа водорода должно проявиться особенно чётко. И действительно, вскоре было обнаружено, что при электролизе происходит весьма интенсивное обогащение тяжёлым изотопом водорода.

Этим открытием воспользовался Льюис. Он подверг кислоты длительному многократному электролизу, в результате чего получил несколько граммов почти чистой тяжёлой воды.

Тяжёлая вода по многим физическим свойствам отличается от лёгкой воды. Её молекулярный вес 20, а не 18, как у обычной воды. Она имеет плотность бо́льшую, чем обычная вода. Плотность тяжёлой воды 1,11. Тяжёлая вода замерзает не при нуле градусов Цельсия, а при 3,8° С. Кипит тяжёлая вода также не при 100° С, а при 101,42° С. Обыкновенная вода имеет максимум плотности при 4° С. Тяжёлая вода отличается и в этом отношении. Температура, при которой тяжёлая вода достигает максимальной плотности, равна 11,6° С. Коэффициент преломления света у тяжёлой воды меньше, чем у обычной. Мы видим, что в целом ряде физических свойств тяжёлая вода заметно отличается от обычной. Особенно резкое различие было обнаружено в биологических свойствах тяжёлой и обычной воды. Оказалось, что в тяжёлой воде не прорастают семена, в ней погибают микробы, а также головастики и рыбы. Повидимому, изменение скорости движения молекул воды, происходящее в результате изменения массы молекул, столь резко меняет кинетику жизненных процессов, что нормальное течение их делается невозможным.

Процесс разделения тяжёлого и лёгкого водородов в настоящее время усовершенствован в такой степени, что удаётся получать «чистую» тяжёлую воду. В спектре паров воды совершенно не наблюдается линий, присущих лёгкому водороду. Видны только спектральные линии тяжёлого водорода.

Получение тяжёлого водорода сыграло большую роль в науке. Оно привело к созданию новых отделов в биологии, химии и физике, способствовало развитию ядерной физики.

ГЛАВА IV

РАСЩЕПЛЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР

1919 г. останется навсегда памятным в истории науки. В этом году Резерфорду впервые удалось произвести и наблюдать искусственное расщепление атомных ядер. Это открытие не принадлежит к числу случайных наблюдений, которые нередко встречаются в истории науки. Весь ход развития наших знаний об атомных ядрах диктовал постановку этих опытов.

Напомним вкратце состояние ядерной науки, сложившееся к 1919 г.

Опыты Резерфорда и ряда других учёных с несомненностью установили реальность существования атомных ядер и их роль в индивидуальных свойствах атомов.

Явление радиоактивности, установление тождественности между альфа-частицами и ядрами атомов гелия, превращение радия в эманацию (радон), а также длинная цепь других радиоактивных превращений воочию показали, что атомные ядра являются сложными образованиями, что в целом ряде ядер имеются одинаковые структурные элементы. Можно было ожидать, например, что альфа-частицы должны быть в целом ряде атомных ядер, например, в ядрах: урана I, урана II, иония, радия, радона, радия A, полония, тория, радиотория, тория X, эманации тория, протактиния и др., ибо в процессе радиоактивного распада все эти вещества испускают альфа-частицы.

Радиоактивные превращения показали, что химические элементы не являются вечными и неизменными, что одни элементы могут превращаться в другие. В этом также можно было видеть подтверждение того, что в строении различных атомных ядер имеется много общих черт.

Наконец, открытие существования изотопов с атомными весами, кратными атомному весу водорода, придало почти

полную достоверность мысли, что все ядра построены из одинаковых простейших элементов, представителями которых могли быть атомное ядро водорода — протон и атомное ядро гелия — альфа-частица.

Могли быть, но являются ли на самом деле? Действительно ли во всех атомных ядрах имеются протоны, альфа-частицы? Этот вопрос, естественно, волновал учёных.

Но как проникнуть внутрь атомных ядер, как доказать, что внутри них имеются такие частицы, как, например, протон?

Казалось, что мысль о проникновении внутрь атомного ядра является чистейшей фантастикой, ибо все эксперименты, проводившиеся с целью хоть как-нибудь воздействовать на атомное ядро (а не то, чтобы проникнуть внутрь ядра), кончились полнейшей неудачей.

Однако, как это иногда бывает, действительность намного превзошла самые смелые фантазии. Оказалось, что существуют средства и для воздействия на атомные ядра.

Аномальное рассеяние альфа-частиц

Мы уже упоминали о том, что Резерфорд и его ученики много занимались изучением рассеяния альфа-частиц. Как помнит читатель, эти опыты и привели к открытию существования атомных ядер.

Придавая очень большое значение этому явлению (рассеянию альфа-частиц), они стремились к возможно более полному его изучению. Всё новые и новые опыты ставились для проверки формулы Резерфорда. В частности, были поставлены и опыты по сравнению рассеяния альфа-частиц на различные углы лёгкими и тяжёлыми элементами. И вот тут-то и обнаружилось удивительное явление. Оказалось, что рассеяние альфа-частиц тяжёлыми элементами происходит «нормально», так, как того требует формула Резерфорда. Рассеяние же альфа-частиц лёгкими элементами происходит «аномально». Распределение интенсивности альфа-частиц, рассеянных по различным направлениям лёгкими элементами, оказалось отличными от того, которое должно быть по теории Резерфорда.

Естественно возник вопрос: почему у тяжёлых элементов рассеяние альфа-частиц происходит так, как предска-

зывает теория Резерфорда, а у лёгких элементов иначе? Отличие тяжёлых элементов от лёгких состоит в следующем.

У тяжёлых элементов заряд ядра большой. Например, у такого тяжёлого элемента, как свинец, заряд ядра равен восьмидесяти двум единицам. Силы отталкивания между такими ядрами и альфа-частицами весьма велики и они заставляют альфа-частицы отклоняться от своего пути ещё относительно далеко от атомного ядра. У лёгких элементов дело обстоит иначе. Заряд ядра этих элементов сравнительно мал. Так, например, заряд атомного ядра азота равен всего лишь семи единицам. Силы, отклоняющие альфа-частицу от таких ядер, будут значительно меньше, чем силы, действующие между альфа-частицей и ядром атома свинца. А если так, то могло оказаться, что причина аномального рассеяния альфа-частиц лёгкими элементами заключается в том, что альфа-частицы слишком близко подходят к ядру, а может быть, даже и проникают внутрь его.

Возможность проникновения альфа-частицы в атомное ядро и привела Резерфорда к мысли — попытаться использовать альфа-частицы, испускаемые радиоактивными веществами, для расщепления атомных ядер.

Альфа-частицы, вылетевшие из недр атомных ядер, несущиеся с огромными скоростями, обладающие, следовательно, громадной кинетической энергией, соответствующей, так сказать, энергиям ядерного масштаба, могли оказаться именно теми «снарядами», которые способны пробить «броню неприступности» нормальных нерадиоактивных атомных ядер.

Для большей уверенности Резерфорд выбрал для этих опытов самые быстрые альфа-частицы, испускаемые радием C′. Эти альфа-частицы имеют скорость 19 200 *км/сек*. В качестве объекта, который должен был подвергнуться сокрушительной бомбардировке альфа-частицами, были выбраны лёгкие элементы.

Расщепление ядер азота

Первым веществом, с которым Резерфорду удалось достигнуть положительных результатов, был азот.

Экспериментальная часть этих опытов была чрезвычайно проста и остроумна.

На рис. 14 схематически изображён прибор, который был использован в этих экспериментах.

Радиоактивный осадок, образованный продуктами распада радия, наносился на маленький диск D, помещаемый внутрь прибора P, наполненного исследуемым газом. Диск D с радиоактивным осадком служил источником альфа-частиц.

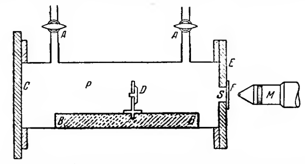


Рис. 14. Схема прибора Резерфорда для наблюдения расщепления атомных ядер.

Размеры прибора P и давление газа в нём подбирались таким образом, чтобы все альфа-частицы, в том числе и самые быстрые из них, поглотились бы внутри газа и не смогли достичь стенки E прибора, в которой было сделано отверстие S. За отверстием S помещался экран F из сернистого цинка, на котором, как мы уже знаем, возникают яркие вспышки, когда на него попадают отдельные альфа-частицы. Чтобы предотвратить попадание наружного воздуха внутрь прибора, отверстие S покрывалось тонким серебряным листком, тщательно приклеенным к стенке. Другой конец прибора закрывался крышкой C, уплотнённой специальной мастикой, предотвращающей обмен между наружным воздухом и газом, наполняющим прибор. При помощи двух кранов AA, один из которых соединял прибор с насосом, а другой с баллоном, содержащим нужный газ, можно было удалить из сосуда один находящийся там газ и наполнить сосуд другим исследуемым газом.

Свечение экрана F наблюдалось при помощи микроскопа M. Само собой разумеется, что все наблюдения велись в темноте.

Наблюдения Резерфорда показали, что если сосуд P наполнен азотом, то на экране F можно было отчётливо заметить яркие сцинтилляции. Как указывалось выше, альфа-частицы не могли достигнуть экрана, следовательно, не они вызывали сцинтилляции. Может быть, из радиоактивного осадка шли какие-то другие неизвестные нам частицы и они-то и вызывали сцинтилляции. Чтобы выяснить это, Резерфорд удалил из прибора азот и заменил его кислородом. Никаких сцинтилляций в этом случае обнаружено не было. Наполнение прибора углекислотой привело к тому же результату. Сцинтилляции не были видны. Итак, частицы, попадающие в опытах с азотом на экран и вызывающие сцинтилляции, были связаны не с радиоактивным источником, а с азотом. Именно в азоте при бомбардировке его альфа-частицами возникают какие-то другие частицы, способные пробежать в воздухе путь в 28 *см*.

Что же это были за частицы?

Для решения вопроса Резерфорд подверг эти частицы действию электрического и магнитного полей, измерил их заряд и массу, установил, что эти частицы являются протонами — ядрами атома водорода.

Откуда же появились протоны? Не есть ли они результат случайной примеси водорода к азоту? Резерфорд незамедлительно принялся за серию опытов, которые надёжно отвергли такую возможность.

Прежде всего азот был подвергнут химической очистке. Однако, как бы тщательно ни очищался азот от водорода, избавиться от сцинтилляций не удавалось и их интенсивность не ослабевала. Следовательно, обнаруженные им протоны не могли быть следствием того, что некоторые альфа-частицы, сталкиваясь с атомами водорода, случайно находящимися среди азота, сообщали им энергию, благодаря чему и возникали протоны настолько большой энергии, что они могли вызывать сцинтилляции при ударе об экран из сернистого цинка. Если так, то, следовательно, *протоны могли появиться только из недр атомных ядер азота.*

Это было поразительное открытие: при бомбардировке азота быстрыми альфа-частицами из ядер азота вылетают протоны. По пробегу протонов можно было определить их энергию. Она оказалась приблизительно равной 6 000 000 электрон-вольт. Если вспомнить, что наибольшая энергия

альфа-частиц, применённых для бомбардировки азота (альфа-частицы RaC′), была 7 700 000 электрон-вольт, то станет ясным, что на выбивание одного протона из ядра азота терялось 1 700 000 электрон-вольт.

Расщепление других элементов

После того как было надёжно установлено, что альфа-частицы действительно выбивают из ядер азота протоны, возникла задача выяснить, в каких других элементах альфа-частицы могут производить аналогичные действия.

Резерфорд подверг бомбардировке альфа-частицами большое количество различных веществ и вскоре обнаружил, что протоны появляются и в некоторых других случаях, а именно, при бомбардировке бора, фтора, натрия, алюминия и фосфора. Во всех этих случаях он наблюдал появление протонов, имеющих пробег больший, чем пробег альфа-частиц, участвующих в бомбардировке. Естественно встал вопрос — не возникают ли при бомбардировке альфа-частицами других элементов также протоны, но меньшей энергии. Обнаружить такие протоны, даже если бы они и существовали, было невозможно, ибо для этого надо было бы приблизить экран настолько близко, что на него стали бы попадать сами альфа-частицы; отличить же вспышку, возбуждаемую альфа-частицей, от вспышки, возбуждаемой протоном, нельзя.

Для того чтобы проверить, не возникают ли такие «короткопробежные» протоны, нужно было изменить методику наблюдения. Вскоре был найден очень простой выход, позволяющий избежать трудности, связанные с соотношением пробегов протонов и альфа-частиц. Экран был перенесён в другое место — вбок, так что оказался совсем в стороне от пути альфа-частиц. Протоны же, вылетающие перпендикулярно к направлению полёта альфа-частиц, могли дойти до экрана и, следовательно, могли быть обнаружены по вызываемым ими сцинтилляциям.

Новый прибор Резерфорда и Чэдвика, предназначенный для наблюдения вырывания протонов в направлении, перпендикулярном к полёту альфа-частиц, изображён на рис. 15. В этом приборе экран F из сернистого цинка стоит так,

что альфа-частицы, выходящие из пластинки D, не могут попасть на него. В то же время протоны, вылетающие из укреплённого на пластинке G исследуемого вещества, подвергающегося бомбардировке альфа-частицами, могли беспрепятственно достигать экрана F, вызывая сцинтилляции. Источник альфа-частиц вместе с облучаемой пластинкой мог перемещаться внутри прибора, благодаря чему менялось расстояние от облучаемого предмета до экрана. Эти исследования показали, что расщепление ядер — выбива-

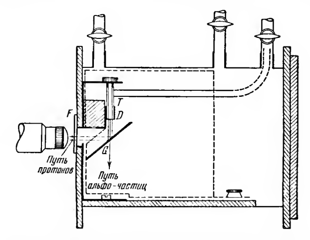


Рис. 15. Прибор Резерфорда и Чэдвика для наблюдения расщепления ядер альфа-частицами по методу прямого угла.

ние протонов — происходит ещё в ряде элементов. Неон, магний, кремний, сера, хлор, аргон и калий оказались также расщепляемыми. Вместе с тем не удалось заметить расщепления ни у одного элемента, расположенного в таблице Менделеева дальше калия. Однако и среди элементов более лёгких, чем калий, удалось расщепить не все. Гелий, литий, бериллий, углерод и кислород оказались стойкими, нерасщепляемыми элементами.

Разрушение ядер альфа-частицами — чрезвычайно редкий процесс. При бомбардировке алюминия на один

миллион бомбардирующих альфа-частиц с пробегом в 7 *см* наблюдается 7—8 протонов.

С увеличением атомного номера вероятность расщепления ядер уменьшается. Это, впрочем, является довольно естественным, ибо с увеличением атомного номера увеличивается заряд ядра, а с ним и силы отталкивания между альфа-частицей и ядром бомбардируемого элемента. Альфа-частице приходится, приближаясь к ядру, затрачивать так много энергии, что у неё уже нехватает энергии на удаление протона из ядра. Очевидно, что при достаточно большом заряде ядра у альфа-частицы может нехватить энергии даже и на то, чтобы приблизиться к ядру. По-видимому, этим и вызвано то, что Резерфорду не удалось наблюдать разрушения элементов, более тяжёлых, чем калий.

Что же, однако, происходит с альфа-частицей при расщеплении ядра?

Опыты Резерфорда, установившие расщепление ядер альфа-частицами, позволяют наблюдать только часть картины расщепления. В этих опытах можно проследить только поведение протона. Что же касается самой альфа-частицы и остальной части ядра, то их судьба оставалась неизвестной.

Опыты Блэкетта

Блэкетт долгое время занимался изучением путей альфа-частиц в камере Вильсона. Он справедливо решил, что явление расщепления атомного ядра должно быть хорошо заметно в такой камере. Появление протонов можно было бы обнаружить потому, что их пробег больше, чем пробег альфа-частицы, а кроме того, ещё и потому, что ионизирующая способность их меньше, чем альфа-частиц, вследствие чего они на своём пути будут создавать меньше ионов. Поэтому на пути протона в камере Вильсона высадится меньше тумана, чем на пути альфа-частицы. На фотографиях, сделанных с камерой Вильсона, след протонов будет более тонким, чем след альфа-частиц.

Выполнение задачи, поставленной Блэкеттом, оказалось необычайно трудным делом. Вспомним, что процесс разрушения ядра происходит очень редко. Нужно, следовательно, сфотографировать следы десятков и даже сотен тысяч альфа-

частиц, прежде чем попадёшь на благоприятный случай, где такое расщепление ядра имеет место. Получить большое количество следов на одной фотографии нельзя, ибо тогда трудно будет разобраться в наблюдаемой картине. В среднем на фотографии умещалось около двух десятков следов альфа-частиц. Для того чтобы сделать заключение о характере превращений, происходящих с атомными ядрами, Блэкетту пришлось снять более двадцати тысяч вильсоновских фотографий. Конечно, для такой работы понадобилось несколько модернизировать фотографирование. Блэкетт и Чэдвик добились того, что фотографирование камеры Вильсона производилось автоматически через каждые 10—15 секунд; только при такой скорости фотографирования можно было в разумное время получить двадцать три тысячи снимков. Следует при этом отметить, что фотографирование велось так, что получались одновременно два снимка камеры Вильсона, перпендикулярные друг к другу. Таким образом, можно было иметь две проекции путей частиц и выяснить взаимное расположение их путей в пространстве.

Камера Вильсона наполнялась азотом. Азот был выбран потому, что вероятность расщепления ядер у него наибольшая.

Среди фотографий, полученных Блэкеттом, было найдено значительное количество следов, заканчивающихся «вилками», они то и интересовали исследователя.

Что же означает такая «вилка». Она показывает, что, начиная с некоторой точки, мы имеем уже не один, а два следа, принадлежащие двум разным частицам. Такие вилки мы видим на фотографиях, представленных на рис. XII и XIII в конце книги. Внимательно анализируя эти вилки, Блэкетт заключил, что они свидетельствуют о процессах столкновения альфа-частиц с ядрами, происходящих в том месте, где находится вершина вилки. В результате столкновения альфа-частица отклонялась от первоначального направления, передавая при этом значительную часть своей энергии ядру, с которым она столкнулась. Получив от соударения с альфа-частицей большую энергию, ядро начинало двигаться с большой скоростью и ионизировать встречные молекулы. Так как заряд ядра обычно больше, чем заряд альфа-частицы, то и ионизация, производимая ядром,

оказывается более значительной. Поэтому след ядра короче и жирнее следов альфа-частиц.

Итак, вилка представляет два следа: след альфа-частицы и след ядра, вступившего с нею во взаимодействие. Однако при рассмотрении следов, оставленных альфа-частицами в камере Вильсона, наполненной азотом, Блэкетт заметил и другого типа вилки. Такие вилки изображены на рис. XIV и XV в конце книги. При рассмотрении в стереоскопе этих снимков становилась ясной картина происшедшего. Толстый («жирный») след альфа-частицы (рис. XIV) задолго до конца её пробега заканчивается вилкой, т. е. двумя следами, исходящими из одной точки. Оба следа, образующих вилку, не похожи на след альфа-частиц. Один из них, значительно более тонкий, заканчивающийся на стенке камеры, несомненно, принадлежит протону, а другой — короткий и гораздо более толстый, чем у альфа-частицы, нужно приписать самому ядру. Где же след альфа-частицы? Его нет. Альфа-частица застряла в ядре азота.

Азот превращается в кислород

Среди всех своих двадцати трёх тысяч фотоснимков Блэкетт обнаружил восемь таких вилок, которые свидетельствуют о расщеплении ядер азота. Во всех восьми актах расщепления ядра, зарегистрированных таким образом, след альфа-частицы заканчивается в месте образования вилки, т. е. во всех этих случаях альфа-частица, проникающая в ядро азота, в нём и остаётся. Ни разу не было зарегистрировано случая, при котором альфа-частица, вызвавшая расщепление ядра азота, отскочила бы от ядра и продолжала свой путь, пусть и изменённый по направлению.

Результат этих наблюдений даёт основание заключить что то, что наблюдал Резерфорд, не есть собственно разрушение ядра. Это скорее превращение ядра, происходящее в результате проникновения альфа-частицы в ядро азота, ибо при этом образуется новое, более тяжёлое, а следовательно, и более сложное ядро, с бóльшим атомным номером.

В самом деле, масса ядра азота равна 14, атомный номер, а следовательно, и заряд ядра, равен 7. Какое изменение произойдёт с этим ядром, если в него влетит альфа-частица?

Массовое число у альфа-частицы равно 4 единицам, а заряд — двум. Следовательно, образующаяся система будет иметь теперь массовое число, равное 18, а заряд — 9 единицам. Так, однако, было бы, если бы из ядра не вылетел протон. Вследствие вылета протона массовое число системы уменьшится на единицу. На единицу уменьшится и заряд.

Итак, в результате захвата альфа-частицы и потери одного протона ядро азота превратится в новое ядро с зарядом в 8 единиц и массовым числом 17. Заряд, равный 8, соответствует атомному номеру восемь. Но восьмое место в таблице Менделеева занимает кислород. Следовательно, в результате проникновения альфа-частицы в ядро азота происходит образование изотопа «кислорода семнадцать» с одновременным выбрасыванием протона. То, что мы здесь рассказали словами, может быть выражено формулой, аналогичной тем, которые применяются для записи химических реакций. Для этого надо условиться, как обозначать различные ядра.

Условимся обозначать ядра химическим символом соответствующего элемента с двумя числами. Одно, слева вверху, означает целочисленное значение атомного веса — массовое число, а другое, слева внизу, означает атомный номер. Так, например, ${}^{6}_{3}Li$ означает ядро изотопа лития с массовым числом шесть. При таком способе обозначения превращение ядра азота должно быть записано так:

$$ {}^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H. $$

Здесь N, He, O, H — химические символы элементов азота, гелия (альфа-частицы), кислорода и водорода (протона). По аналогии с химическими превращениями ядерные превращения часто называют ядерными реакциями. Приведённая выше формула представляет, следовательно, ядерную реакцию «азота семь» с «гелием четыре». В результате этой реакции азот превращается в кислород.

Справедливость вывода о превращении азота в кислород Блэкетт мог проверить ещё одним способом. Поскольку снимки делались стереоскопическими, можно было измерить углы, образованные траекториями частиц, участвующих в превращениях. Зная эти углы, а также начальную скорость альфа-частицы и скорость протона, можно было, пользуясь законами сохранения энергии и количества движения,

вычислить массу образующегося нового ядра. По измерениям Блэкетта масса нового ядра оказалась равной 17 единицам, что и подтвердило вывод, сделанный ранее.

К приведённым аргументам можно добавить ещё один аргумент в пользу вышеприведённой картины превращения ядра азота. Для этого нам придётся немного заняться своеобразной «ядерной бухгалтерией» — составлением так называемого энергетического баланса.

Как следует из измерений пробегов альфа-частиц и протонов, последние имеют энергию, на 1,7 миллиона электрон-вольт меньшую, чем энергия альфа-частицы. Рассмотрим внимательнее энергетический баланс происходящего ядерного превращения. До столкновения энергия всей рассматриваемой системы состояла из трёх частей:

1) энергии, заключённой в покоящемся ядре азота с массой четырнадцать. По формуле (8) эта энергия равна массе ядра $m_{N_{14}}$, умноженной на квадрат скорости света;

2) энергии, заключённой в покоящемся ядре гелия с массой четыре (альфа-частице). Эта энергия равна $m_\alpha c^2$, где m_α означает массу альфа-частицы.

3) кинетической энергии альфа-частицы — W_α.

После того как произойдёт столкновение и образуется новое ядро, полная энергия будет слагаться из четырёх частей:

1) энергии, заключённой в покоящемся ядре изотопа кислорода с массой семнадцать;

2) энергии, заключённой в ядре водорода (протоне);

3) кинетической энергии протона W_p и, наконец,

4) кинетической энергии ядра кислорода $W_{O_{17}}$.

По закону сохранения энергии при всех превращениях полный запас энергии не изменяется. Сколько было энергии до столкновения, столько её будет и после столкновения. Это утверждение может быть записано в виде равенства

$$m_{N_{14}}c^2+m_\alpha c^2+W_\alpha=m_{O_{17}}c^2+m_p c^2+W_p+W_{O_{17}}.$$

По измерениям Блэкетта разность между кинетической энергией альфа-частицы и частиц, образующихся после захвата, равна 1,2 миллиона электрон-вольт, т. е.

$$W_\alpha-(W_p+W_{O_{17}})=1{,}2\cdot 10^6 \text{ электрон-вольт}.$$

Это означает, что сумма масс ядра кислорода 17 и протона должна быть больше суммы масс альфа-частицы и ядра азота на величину, соответствующую 1,2 миллиона электрон-вольт. Так как точные значения масс рассматриваемых атомов известны, то легко проверить это утверждение. Для этого нам нужно только указанную разность энергий перевести в единицы массы. По формуле (8) один миллион электрон-вольт соответствует $1{,}07\cdot10^{-3}$ единицы атомного веса. Нетрудно подсчитать, что 1,2 миллиона электрон-вольт соответствуют $1{,}28\cdot10^{-3}$ единицы атомного веса.

Таким образом, должно быть

$$(A_{O_{17}}+A_H)-(A_{N_{14}}+A_{He})=1{,}28\cdot10^{-3}.$$

В этом соотношении вместо масс ядер взяты массы соответствующих атомов. Это можно сделать, хотя масса атома, а следовательно, и атомный вес отличаются от массы ядра на величину, равную массе всех электронов, находящихся в оболочке атома. В атомах ${}^{17}_{8}O+{}^{1}_{1}H$, вместе взятых, содержится 9 электронов, но в ${}^{14}_{7}N$ и ${}^{4}_{2}He$ тоже 9 электронов, т. е. мы прибавили и вычли одно и то же число. Из таблицы атомных весов изотопов (см. стр. 100) мы находим, что

$$A_H = 1{,}00813,$$
$$A_{He} = 4{,}00386,$$
$$A_{N_{14}} = 14{,}00753,$$
$$A_{O_{17}} = 17{,}00450.$$

Из этих данных получаем

$$(A_{O_{17}}+A_H)-(A_{N_{14}}+A_{He})=1{,}24\cdot10^{-3}.$$

Очевидно, следует признать, что оба числа, одно из которых получается из атомных весов, а другое — из измерений пробегов, прекрасно согласуются между собой.

При превращении ядра азота 14 в ядро кислорода 17 свободная кинетическая энергия исчезает. Сумма кинетических энергий протона и кислородного ядра на 1,2 миллиона электрон-вольт меньше, чем кинетическая энергия альфа-частицы. Всегда ли происходит так, что при ядерных превращениях кинетическая энергия теряется? Оказывается, что нет. Более того, в некоторых случаях наблюдается даже

выигрыш в кинетической энергии. С этой точки зрения интересно превращение, которое происходит с ядром алюминия. При бомбардировке алюминия альфа-частицами радия C′, имеющими пробег 6,9 *см* и энергию 7,7 миллиона электрон-вольт, вылетают протоны с пробегом 90 *см*, что соответствует кинетической энергии 10,7 миллиона электрон-вольт.

Превращение алюминия (если альфа-частица захватывается его ядром) должно протекать по схеме

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si} + ^{1}_{1}\mathrm{H},$$

т. е. из ядра алюминия 27 образуется ядро изотопа кремния с массовым числом 30. По значениям масс можно опять-таки проверить энергетический баланс превращения ядра алюминия. Аналогично предыдущему имеем

$$m_{\mathrm{Al}_{27}}c^2 + m_\alpha c^2 + W_\alpha = m_{\mathrm{Si}_{30}}c^2 + m_p c^2 + W_p + W_{\mathrm{Si}_{30}}.$$

Таким образом,

$$\frac{W_\alpha - (W_p + W_{\mathrm{Si}_{30}})}{c^2} = (A_{\mathrm{Si}_{30}} + A_{\mathrm{H}}) - (A_{\mathrm{Al}_{27}} + A_{\mathrm{He}}).$$

По данным таблицы атомных весов изотопов имеем

$$\left.\begin{aligned} A_{\mathrm{Si}_{30}} &= 29{,}98290 \\ A_{\mathrm{H}} &= 1{,}00813 \end{aligned}\right\} 30{,}99103,$$

$$\left.\begin{aligned} A_{\mathrm{Al}_{27}} &= 26{,}99069 \\ A_{\mathrm{He}} &= 4{,}00386 \end{aligned}\right\} 30{,}99455,$$

т. е. сумма атомных весов алюминия и альфа-частицы на $3{,}52 \cdot 10^{-3}$ единицы атомного веса больше, чем сумма атомных весов кремния и водорода. Но $3{,}52 \cdot 10^{-3}$ единицам атомного веса соответствует энергия 3,3 миллиона электрон-вольт. Измерение пробегов протона и ядра кремния позволило определить их энергии. Оказалось, что $W_\alpha - (W_p + W_{\mathrm{Si}})$ равно 3 миллионам электрон-вольт. Если учесть ошибки в измерении кинетической энергии частиц, а также ошибки в определении массы кремния и алюминия (точность определения массы алюминия не превышает четырёх единиц четвёртого знака после запятой, что соответствует энергии в 400 000 электрон-вольт), то станет ясно, что различие в обоих числах лежит в пределах точности измерений масс.

Вывод из этих рассуждений весьма важен. *При превращении алюминия в кремний происходит выделение энергии и притом весьма значительное — в семьсот тысяч раз больше, чем от сгорания такого же количества углерода.*

Такой громадный выигрыш энергии, естественно, ставит вопрос об её практическом применении. Нетрудно, однако, убедиться, что получение энергии таким способом не выгодно. Вспомним, что одно превращение ядра алюминия приходится на 125 000 альфа-частиц. Энергия каждой альфа-частицы 7,7 миллиона электрон-вольт. Чтобы получить выигрыш энергии в три миллиона электрон-вольт (превращение ядра алюминия), нам нужно затратить вхолостую $7{,}7 \cdot 125 \cdot 10^3$ миллионов электрон-вольт. Ясно, что это не рентабельно.

Открытие Резерфордом ядерных превращений не дало ещё в руки человечества возможности использования ядерной энергии. Тем не менее эти опыты послужили как бы «первой ласточкой». Они показали принципиальную возможность искусственного выделения энергии из «ядерной кладовой», и с того времени мысль об этом не покидала учёных.

Почему не все элементы расщепляются под действием альфа-частиц

Мы уже упоминали, что в первых опытах Резерфорда, когда метод наблюдения позволял замечать только быстрые протоны, имеющие пробег больший, чем пробег бомбардирующих альфа-частиц, удалось наблюдать расщепление ядер только у азота, бора, фтора, натрия, алюминия и фосфора. Когда же методика наблюдения изменилась так, что можно было замечать и протоны меньших энергий, то удалось обнаружить расщепление ряда других ядер — неона, магния, кремния, серы, хлора, аргона и калия. О причинах, по которым не были расщеплены элементы более тяжёлые, чем калий, мы уже упоминали. Они состоят в том, что силы отталкивания между ядрами с большим зарядом и альфа-частицами таковы, что альфа-частица не может подойти достаточно близко к ядру, если её запаса кинетической энергии будет недостаточно для того, чтобы совершить необходимую работу против сил отталкивания.

Но ведь Резерфорду не удалось расщепить не только тяжёлые ядра, но даже и совсем лёгкие, такие, как гелий, углерод, кислород. Почему же они оказались такими прочными? Может быть, потому, что эти ядра вообще неразрушаемы и представляют собой простые образования, а может быть, они — такие же сложные образования, как и другие ядра, но только более прочно связанные? Нетрудно решить, какое из предположений верно; ведь мы знаем величину массы этих ядер, следовательно, можем определить энергию связи, которая, как мы указывали, и есть мера прочности ядер. Мы можем, однако, не прибегая к этому расчёту, определить, какая энергия потребуется, чтобы из ядра, захватившего альфа-частицу, вылетел протон.

Рассмотрим для примера превращение гелия. Разберёмся, что должно было бы образоваться, если бы такое превращение произошло. Это легко видеть из схемы превращения

$$^4_2\mathrm{He} + ^4_2\mathrm{He} \rightarrow ^7_3\mathrm{Li} + ^1_1\mathrm{H}.$$

В соответствии с этой схемой баланс энергии должен быть записан так:

$$2m_{\mathrm{He}}c^2 + W_\alpha = (m_{\mathrm{Li}_7} + m_{\mathrm{H}})\,c^2 + W_{\mathrm{Li}_7} + W_{\mathrm{H}}.$$

В таблице V мы находим значения атомных весов, а следовательно, и масс интересующих нас атомов:

$$A_{\mathrm{He}} = 4{,}00386,$$
$$A_{\mathrm{Li}_7} = 7{,}01816,$$
$$A_{\mathrm{H}} = 1{,}00813.$$

Разность масс $(m_{\mathrm{H}} + m_{\mathrm{Li}_7}) - 2m_{\mathrm{He}} = 0{,}01857$; энергия, соответствующая этой разности масс, равна 17,5 миллиона электрон-вольт. Следовательно, на такую же величину сумма кинетических энергий протона и образующегося ядра лития должна быть меньше кинетической энергии альфа-частицы. Но ведь энергия альфа-частиц, применявшихся в опытах Резерфорда, составляла всего лишь 7,7 миллиона электрон-вольт. Ясно, что такая альфа-частица не смогла бы выбить протона, даже если бы она и проникла в ядро гелия. Для совершения указанного в схеме превращения гелия в литий у альфа-частиц нехватает энергии. Если бы Резерфорд смог использовать в своих опытах альфа-частицы с кинети-

ческой энергией большей, чем 17,5 миллиона электрон-вольт, то ему, вероятно, удалось бы расщепить и ядро гелия, а также ядра углерода и кислорода, ибо для их превращения нужна энергия меньшая, чем для превращения ядра гелия. Но так как в распоряжении Резерфорда не было альфа-частиц такой большой энергии, его опыты в отношении этих элементов окончились неудачей.

На этом мы заканчиваем описание опытов Резерфорда по расщеплению атомных ядер. Основные результаты, полученные из этих опытов, могут быть сформулированы следующим образом:

1. Показано, что атомные ядра являются сложными образованиями. Они могут захватывать альфа-частицы (ядра гелия). Из них можно выбить протон — ядро водорода.

2. Возможно искусственное превращение одних элементов в другие. Блэкетт доказал, например, что ядра азота превращаются в результате бомбардировки альфа-частицами в ядра кислорода. Это превращение возможно, однако, только в результате воздействия достаточно быстрых частиц. Энергия, необходимая для его осуществления, равна нескольким миллионам электрон-вольт.

3. Некоторые ядерные превращения происходят с выделением энергии, т. е. кинетическая энергия ядер, образующихся после превращения, оказывается большей, чем энергия альфа-частицы, вызвавшей это превращение.

4. Ядра элементов построены не одинаково прочно. Некоторые ядра построены столь прочно, что их нельзя расщепить даже при помощи тех энергичных альфа-частиц, которые применил Резерфорд. Для превращения таких ядер нужны уже не миллионы электрон-вольт, а больше — 10—20 миллионов электрон-вольт.

Открытие нейтронов

Десятилетие, последовавшее за опытами Резерфорда по расщеплению ядер, было сравнительно спокойным. В лабораториях, занимавшихся изучением атомного ядра, шла деятельная работа. Ядра различных веществ подвергались бомбардировке альфа-частицами. Исследовались и изучались различные детали в процессах ядерных превращений, рассеяния альфа-частиц и т. д. Однако широкого внимания

к себе эти исследования не привлекали. Результаты, добытые учёными, обсуждались главным образом в кругу специалистов, пока, наконец, в 1932 г. не было сделано новое замечательное открытие.

История этого открытия следующая.

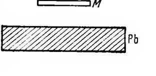
Резерфорд и другие исследователи, занимавшиеся изучением превращения ядер, регистрировали превращение, совершившееся с ядром, по появлению протона.

Как мы уже указывали, не во всех элементах альфа-частицы, испускаемые радием С, могут вызвать ядерное превращение, сопровождающееся вылетом протона. Мы знаем, например, что для выбивания протонов из ядер гелия нужны альфа-частицы значительно бо́льших энергий, поэтому даже в том случае, когда альфа-частица радия С проникнет в ядро гелия, протон не сможет вылететь из образовавшегося ядра. Однако трудно было предполагать, что с образовавшимся после захвата альфа-частицы ядром ничего не произойдёт. Скорее следовало предположить, что с ядром произойдёт какое-то другое превращение, не сопровождающееся вылетом протона. Если бы такие превращения с ядрами действительно происходили, то при методе наблюдения, применённом Резерфордом и его сотрудниками, они оставались бы незамеченными. Поэтому Ботэ и Беккер задались целью выяснить, не возникает ли при бомбардировке ядер альфа-частицами что-нибудь другое, кроме наблюдённых уже протонов, что не могло быть обнаружено при помощи экрана из сернистого цинка. Экран из сернистого цинка не даёт, например, возможности наблюдать ни электроны, ни гамма-лучи. Не возникают ли и эти частицы при бомбардировке различных веществ альфа-частицами?

Опыты Ботэ и Беккера по идее были крайне просты. Схема их представлена на рис. 16. Вблизи источника альфа-частиц, которым служила серебряная пластинка S с осаждённым на ней полонием, помещалась пластинка M из исследуемого вещества. Возникновение в пластинке M какого-либо излучения (электронов или гамма-лучей) могло быть зарегистрировано при помощи счётчика Гейгера-Мюллера. Для того чтобы сделать возможным изучение свойств излучения, если бы таковое возникало, было предусмотрено помещение между испытуемой пластинкой M и счётчиком G свинцовых фильтров Pb из пластин различной толщины.

Хотя полоний испускает альфа-частицы и не столь большой энергии, как радий C′ (энергия альфа-частиц, испускаемых полонием, равна 5,25 миллиона электрон-вольт, а пробег — 3,72 *см*), он был выбран в качестве источника альфа-частиц потому, что он не испускает ни бета-, ни гамма-лучей. Желание иметь поток только альфа-частиц и побудило Ботэ избрать для бомбардировки альфа-лучи полония.

Результат этих простых опытов оказался весьма интересным: удалось обнаружить, что при облучении некоторых веществ (бериллия, лития, бора) возникают какие-то лучи, которые способны вызывать разряды в счётчике Гейгера-Мюллера. Число этих разрядов для различных элементов было различным. Наиболее сильный эффект был замечен при облучении бериллия — одного из элементов, который не удалось расщепить Резерфорду и Чэдвику.



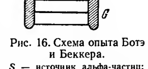


Рис. 16. Схема опыта Ботэ и Беккера.

S — источник альфа-частиц; *M* — пластинка из бериллия; *G* — счётчик Гейгера-Мюллера.

Бериллиевое излучение — как мы будем пока его называть — оказалось весьма проникающим. При прохождении через слой свинца толщиной в 2 *см* интенсивность излучения уменьшалась только на 13%.

Такое проникающее излучение не было новинкой для физиков. Они уже знали, что гамма-лучи обладают способностью проходить со сравнительно малым ослаблением интенсивности через значительные толщи различных веществ, в том числе и свинца. Поэтому, когда Ботэ и Беккер решили, что излучение, исходящее из бериллия при бомбардировке его альфа-лучами, есть не что иное, как гамма-лучи, это показалось весьма правдоподобным.

Нетрудно было, казалось, и понять, откуда такое излучение могло возникнуть.

Уже из опытов Резерфорда было ясно, что альфа-частицы достаточно большой энергии могут проникать внутрь ядер лёгких элементов. При этом, естественно, должно было бы происходить ядерное превращение. Например, ядро бериллия, имеющее массу 9 и заряд 4, должно было бы после

захвата альфа-частицы превратиться в ядро с массой 13 и зарядом 6.

Но ядро с зарядом 6 — это ядро атома элемента, который в таблице Менделеева занимает шестое место. А это — углерод. Таким образом, мы приходим к выводу, что при захвате альфа-частицы ядром бериллия образуется ядро изотопа углерода с массой 13.

Однако можно ожидать, что образующееся ядро углерода 13 будет отлично от ядра нормального изотопа углерода 13. В самом деле, нормальное ядро углерода 13 имеет вполне *определённую* энергию, между тем как образованное при бомбардировке бериллия ядро углерода 13 будет обладать энергией, зависящей от кинетической энергии альфа-частицы. Это обстоятельство и определяет отличие образующегося ядра углерода 13 от нормального. Образующееся из бериллия и альфа-частицы ядро углерода 13 обладает избытком энергии. Спрашивается, куда же исчезает этот избыток энергии?

Если бы при слиянии ядра бериллия и альфа-частицы вылетал протон, как, например, в ранее рассмотренных ядерных превращениях, то этот избыток энергии мог бы быть унесён из ядра в виде кинетической энергии протона. Но так как опытами Резерфорда и Чэдвика было твёрдо установлено, что протоны при облучении бериллия альфа-частицами не возникают, то этот путь выделения излишка энергии оказывается закрытым. Оставалось, по мнению учёных, единственно возможное — выделение энергии в виде гамма-лучей.

Такая трактовка результатов опытов Ботэ и Беккера придавала этим опытам большое значение, ибо они означали открытие не только факта возникновения гамма-излучения при ядерных превращениях, но и нового вида превращения ядер — захвата альфа-частицы без выделения протона. Понятно поэтому, что опытами Ботэ и Беккера заинтересовались многие учёные, предпринявшие детальное изучение бериллиевого излучения.

Воспользовавшись тем обстоятельством, что проникающая способность гамма-лучей является мерой их энергии, учёные произвели тщательные измерения проникающей способности бериллиевого излучения и, предполагая, что это — гамма-лучи, определили величину кванта этих лучей. Она

оказалась равной 7 миллионам электрон-вольт. Пользуясь этими данными, можно было подвергнуть гипотезу о природе бериллиевого излучения проверке при помощи энергетического баланса, таким же образом, как мы это делали при проверке превращений, происходящих с выбрасыванием протонов. Однако к этому времени масса ядра бериллия не была точно известна, и такой контроль не мог быть произведён. Вскоре, однако, выяснились новые факты, которые сделали гипотезу Ботэ и Беккера о природе бериллиевого излучения весьма сомнительной.

Французские учёные Фредерик Жолио и Ирэн Кюри повторили опыты Ботэ и Беккера, немного изменив методику наблюдения бериллиевого излучения. Вместо счётчика Гейгера-Мюллера они применили другой прибор — ионизационную камеру, при помощи которой они могли измерять ионизацию, производимую бериллиевым излучением. Как это и можно было ожидать в соответствии с предположением Ботэ, ионизирующая способность бериллиевого излучения оказалась незначительной. Однако, когда Жолио и Кюри внесли в ионизационную камеру парафин, то они заметили сильное увеличение ионизационного тока, достигавшее почти двукратного значения. Внося различные вещества внутрь ионизационной камеры, они установили, что увеличение тока в ионизационной камере происходит тогда, когда в камеру, подвергающуюся действию бериллиевого излучения, вносятся вещества, содержащие водород.

Установив этот факт, Жолио и Кюри дали ему следующее объяснение. Кванты гамма-излучения обладают большой энергией. Следовательно, они должны иметь и значительное количество движения. При столкновении гамма-кванта с атомами водорода гамма-квант передаёт им часть своего количества движения (так же как один шар может передать при столкновении своё количество движения другому шару). Вследствие этого протоны приходят в движение, а так как ионизирующая способность их по сравнению с гамма-квантами очень велика, то даже небольшое число протонов, созданное бериллиевым излучением, способно создать в камере такую ионизацию, какую создаёт само бериллиевое излучение. Так как масса кванта мала, то, по законам механики, энергия, передаваемая им при столкновении с ядрами, будет тем меньше, чем больше масса того

ядра, с которым квант столкнулся. Это объясняет, почему именно водород, вносимый в ионизационную камеру, действует столь сильно, в то время как, например, азот, имеющий массу, в четырнадцать раз бо́льшую, вызовет в четырнадцать раз меньшее действие, чем водород.

Возникновение протонов под влиянием облучения водородосодержащих веществ бериллиевым излучением было подтверждено и прямыми опытами — наблюдением в камере Вильсона. В камере Вильсона, содержащей водород (в парах воды и спирта) и облучённой бериллиевым излучением, можно было видеть появление следов протонов. Удалось даже измерить их пробег. Он оказался равным 25 *см*. По величине пробега можно было определить энергию протонов, а зная последнюю, вычислить энергию, которой должны обладать кванты гамма-лучей, чтобы в результате столкновения сообщить протонам имеющуюся у них энергию.

Результаты вычисления оказались неожиданными. По расчёту Жолио получалось, что гамма-лучи должны обладать громадной, даже по ядерным масштабам, энергией в 55 миллионов электрон-вольт!

Неожиданным явилось не только то, что результаты опытов Кюри и Жолио противоречили тщательным измерениям, проделанным ранее, но и сама цифра — 55 миллионов электрон-вольт! Откуда могла получиться такая громадная энергия? Ведь бомбардирующая альфа-частица обладала энергией всего лишь в 5 миллионов электрон-вольт. Казалось невозможным придумать какое-либо простое объяснение результату, полученному Жолио и Кюри. Однако ещё более странными оказались результаты исследований, произведённых Чэдвиком. Он подверг действию бериллиевого излучения азот и аргон. В обоих газах он обнаружил появление частиц с большой кинетической энергией, правда меньшей, чем в водороде. Так, в азоте возникали частицы, имевшие пробег всего лишь в 3 *мм*. Однако если подсчитать, какой энергией должен был бы обладать гамма-квант, чтобы сообщить ядрам азота при столкновении такую энергию, которая позволила бы им пробежать в газе путь в 3 *мм*, то оказывается, что для этого недостаточно и 55 миллионов электрон-вольт. Для этого гамма-квант должен был бы иметь энергию, равную 90 миллионам электрон-вольт. Расчёты, про-

изведённые для аргона, привели к ещё большей цифре. Чтобы объяснить результаты опыта, приходилось приписывать гамма-квантам энергию в 150 миллионов электрон-вольт!

Итак, предположение о том, что проникающее излучение, создаваемое при бомбардировке бериллия альфа-частицами, представляет собой гамма-лучи, приводит к противоречивым результатам относительно энергии этих лучей.

1) Из опытов по поглощению в свинце получаем её равной 7 миллионам электрон-вольт,

2) из опытов по измерению пробегов ядер отдачи в водороде — 55 миллионов электрон-вольт,

3) из измерения пробегов ядер отдачи в азоте — 90 миллионов электрон-вольт и по измерениям пробегов ядер отдачи в аргоне — 150 миллионов электрон-вольт.

Эти результаты, относящиеся к одной и той же величине, различаются настолько, что возникло сомнение в правильности основного допущения, сделанного Ботэ и Беккером. Разрешить возникшие сомнения, устранить противоречие в полученных результатах можно было только путём изменения представления о природе бериллиевого излучения. Это и сделал Чэдвик.

Он предположил, что излучение, наблюдаемое при облучении бериллия (а также лития и бора) альфа-частицами, представляет собой не гамма-лучи, а поток новых, неизвестных ранее частиц. Эти частицы имеют размеры, близкие к размерам атомных ядер, и массу, примерно равную массе протона. Однако в отличие от протонов эти частицы лишены заряда. Отсутствие заряда дало Чэдвику повод назвать их «нейтронами».

Собрание таких частиц вело бы себя весьма любопытным образом. Поскольку заряд их равен нулю, элемент, состоящий из этих частиц, должен был бы в таблице Менделеева занять место впереди водорода. Это был бы «нулевой элемент». «Нулевой элемент» являлся бы прототипом благородных газов. Атомы нулевого элемента в химическом отношении были бы совершенно инертны, так как у них не было бы никакой электронной оболочки.

Обнаружить существование «нулевого элемента» нелегко. Поскольку атомы нулевого элемента состоят только из одних нейтральных ядер, они не взаимодействуют с электри-

ческими полями. Взаимодействие «нулевого элемента» с электронами и ядрами обычных элементов происходило бы лишь при очень тесном их сближении. «Непроницаемость» атомов, обусловленная взаимным отталкиванием их электронных оболочек, здесь не имела бы места. По отношению к нейтронам всякое вещество представляется не сплошным, а в виде решета с очень большими ячейками, через которые нейтроны могут свободно проникать. Собранный в какой-нибудь сосуд, нулевой элемент в течение короткого времени покинул бы его, пройдя через его стенки.

Единственным действием нулевого элемента, которое делает возможным его обнаружение, является прямое столкновение нейтронов с ядрами обычных элементов. Свойства нулевого элемента весьма необычны. Заметим, однако, что ещё в 1920 г. Резерфорд указал на возможность существования нулевого элемента, однако поиски его, предпринятые в то время, закончились неудачей.

Высказанная Чэдвиком новая гипотеза позволила просто и без противоречий объяснить все особенности бериллиевого излучения, а дальнейшее развитие исследования атомных ядер приносило всё новые и новые подтверждения правильности этой гипотезы, и в настоящее время мы считаем существование нейтронов столь же реальным, как существование протонов и электронов.

Методы наблюдения нейтронов

Каким же образом можно регистрировать нейтроны, наблюдать их появление, отличать их от других частиц, изучать их свойства?

Все разнообразные методы, применяемые в ядерной физике для наблюдения и регистрации отдельных частиц, основываются на воздействии, производимом этими частицами на атомы той среды, в которой они движутся. Наблюдение следов в камере Вильсона возможно потому, что альфа-частицы, протоны и электроны, обладающие большой энергией, производят ионизацию встречных атомов. На образовавшихся ионах и оседает водяной пар. Гамма-лучи непосредственно в камере Вильсона не обнаруживаются, ибо они почти не ионизируют встречные атомы. Изредка они выбивают из атомов быстрые электроны. Таким образом, о гамма-

лучах мы можем при помощи камеры Вильсона судить лишь по вторичным признакам — по появлению быстрых электронов.

Счётчик Гейгера также срабатывает только в том случае, если внутри него создаются электрические заряды. Фотографический метод регистрации частиц также возможен только вследствие непрерывной ионизации и возбуждения атомов серебра, находящихся в светочувствительной эмульсии фотопластинок. Однако нейтроны не ионизируют встречные атомы.

Каким же образом мы можем регистрировать их и отличать их действие от действия других частиц? Отличие нейтронов от остальных лучей, встречающихся в ядерной физике, основано на свойстве нейтронов проходить через значительные слои вещества, в частности свинца. Благодаря этому пучок нейтронов можно сразу же отделить от альфа-, бета- и рентгеновских лучей, профильтровав их свинцом, т. е. пропустив исследуемый пучок через свинцовую пластинку. Но через свинцовую пластинку могут пройти и гамма-лучи. Как же отличить нейтроны от гамма-лучей? Для этого можно воспользоваться различием в механизме взаимодействия обоих родов лучей с веществом.

Допустим, что поток гамма-лучей проходит через камеру Вильсона. Что мы увидим на фотоснимках? Так как гамма-кванты обладают малой массой, то естественно, что при столкновении с ядром гамма-лучи будут передавать ему очень малую часть своей энергии, так что такого рода столкновения практически никакого значения иметь не будут. Другое дело — столкновение гамма-кванта с электроном. Масса электрона сравнима с массой кванта, поэтому при столкновении гамма-квант может передать электрону значительную часть своей энергии. В результате столкновения возникает быстрый электрон.

Итак, быстрые электроны и медленно движущиеся ядра — такова картина действия гамма-лучей. Поэтому на фотоснимках камеры Вильсона, пронизываемой гамма-лучами, мы будем наблюдать только тонкие следы, принадлежащие электронам. Движение ядер в силу их малой энергии вообще не будет заметно.

Какое же действие будут оказывать нейтроны? Так как масса нейтрона такого же порядка, как и масса лёгких

ядер, то нейтрон в состоянии передать лёгким ядрам при столкновении с ними бо́льшую часть своей энергии. Особое значение приобретает столкновение с ядрами водорода.

Вследствие равенства масс при лобовом ударе нейтрон может передать протону всю свою энергию. Любителям биллиардной игры такой случай столкновения двух шаров должен быть хорошо знаком. Они не раз наблюдали, как при прямом ударе ударяющий шар останавливается, а другой шар, до того неподвижный, отлетает с такой скоростью, какую имел ударивший шар.

Иначе будет выглядеть столкновение нейтронов с электронами. Благодаря большой массе нейтрон при столкновении с электроном будет отдавать ему только малую долю своей энергии (в среднем одну двухтысячную). Следовательно, такие столкновения будут создавать электроны небольшой энергии, которые в камере Вильсона остаются незамеченными. Число таких электронов будет мало́, ибо нейтрон не действует на электрическое поле электрона. Поэтому ионизирующая способность нейтрона будет мала. Итак, быстрые ядра и медленные электроны — вот результат взаимодействия нейтронов с атомами. Картина, следовательно, обратная той, которую мы имели в случае гамма-лучей. При прохождении нейтронов через камеру Вильсона в ней должно наблюдаться появление следов быстрых ядер отдачи (протонов, ядер азота). Обладая большой ионизирующей способностью, последние будут производить в камере интенсивную ионизацию, следствием чего будет образование густого тумана — жирных следов. Возникновение этих следов в камере Вильсона и является надёжным признаком наличия нейтронов в составе исследуемого излучения.

Для иллюстрации действия нейтронов в конце книги приведены фотографии XVI и XVII, полученные Жолио и Кюри с камерой Вильсона. На рис. XVI виден след протона, выбитого нейтронами из парафина. Источник нейтронов в этом опыте находился внизу, снаружи камеры. На рис. XVII показан след ядра гелия, пришедшего в движение в результате столкновения с нейтроном.

Метод камеры Вильсона и некоторые другие методы регистрации нейтронов, здесь не описанные, но основанные на

свойстве нейтронов образовывать быстрые ядра отдачи, применялись на ранней стадии изучения свойств нейтронов. В последующем были найдены другие, более простые и удобные методы.

Ядерные превращения, приводящие к образованию нейтронов

Трудно переоценить значение открытия нейтронов. Можно смело утверждать, что все последующие успехи ядерной физики определяются в значительной степени этим открытием. Учёным сразу стало ясно, что открытые Чэдвиком новые частицы должны играть большую роль в ядерных процессах и превращениях. Само их возникновение есть результат ядерного превращения.

Напишем схему превращения, результатом которого оказалось появление нейтрона. Ядро бериллия имеет массовое число, равное девяти единицам, и заряд — четыре единицы; после захвата альфа-частицы массовое число полученного ядра будет равно тринадцати, а заряд — шести. Так было бы, если бы из него не вылетел нейтрон. После вылета нейтрона заряд остающегося ядра не изменится и будет равен шести, а массовое число уменьшится на единицу и станет равным двенадцати. Но заряд ядра — шесть — означает, что мы получили элемент с атомным номером шесть. А этот элемент есть углерод. Итак, ядро бериллия, испускающее нейтрон под обстрелом альфа-частицами, превращается в ядро углерода двенадцать. Чтобы записать схему этого ядерного превращения, нужно условиться о символе, обозначающем нейтрон. Было принято обозначать нейтрон маленькой буквой n, а в схемах ядерных превращений приписывать вверху его массовое число — единицу, а внизу заряд — нуль. При таком обозначении схема превращения запишется так:

$$^{9}_{4}\mathrm{Be} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow {}^{12}_{6}\mathrm{C} + {}^{1}_{0}n.$$

Аналогичная схема превращений может быть написана для бора и лития, бомбардировка которых альфа-частицами также сопровождается вылетом нейтрона. Однако в этих случаях дело обстоит несколько сложнее. Ведь бериллий состоит только из одного изотопа, и поэтому ясно, с каким ядром происходит ядерное превращение, результатом

которого является возникновение нейтронов, а у лития и у бора по два изотопа. Поэтому установление превращения оказалось делом нелёгким и на первых порах не обошлось без ошибок. Основным соображением, которым руководствовались вначале учёные, было мнение, что в результате ядерного превращения должны получаться известные изотопы. С этой точки зрения следовало приписать испускание нейтронов при бомбардировке лития альфа-частицами изотопу литий 7. Конечным продуктом превращения будет тогда изотоп бор 10. Если превращение происходило бы с ядром лития 6, то конечным продуктом был бы изотоп бора с массовым числом 9. Однако такого изотопа у бора не было обнаружено, поэтому считали, что реакция превращения должна записываться так:

$$^{7}_{3}\mathrm{Li} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{10}_{5}\mathrm{B} + ^{1}_{0}n.$$

По аналогичным соображениям испускание нейтронов бором было приписано изотопу бор 11, ибо предположение, что бор 10 испускает нейтроны, приводило, казалось, к нелепости, а именно,

$$^{10}_{5}\mathrm{B} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{1}_{0}n + \mathrm{X}.$$

Этим X должен быть элемент с атомным номером семь (азот) и массой тринадцать, но о существовании такого изотопа азота ничего не было известно. Поэтому Чэдвик решил, что превращение бора при бомбардировке альфа-частицами должно происходить по схеме

$$^{11}_{5}\mathrm{B} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{14}_{7}\mathrm{N} + ^{1}_{0}n.$$

Установлению этой схемы превращения придавалось большое значение. Дело в том, что из трех элементов (литий, бериллий, бор), при бомбардировке которых наблюдалось возникновение нейтронов, масса бора была известна наиболее точно. Поэтому, установив характер превращения и определив кинетическую энергию образующихся нейтронов, можно было из энергетического баланса вычислить величину массы нейтрона. Чэдвик так и поступил. Найденное им значение массы нейтрона 1,0067 оказалось несколько меньше массы протона 1,00758. Однако, как впоследствии выяснилось, превращение, происходящее с бором, было расшифровано неправильно, и найденное Чэдвиком значение массы нейтрона оказалось неверным.

В последующем, по мере развития наших знаний о ядерных превращениях, происходящих с участием нейтронов, и уточнения значений масс атомов, удалось измерить массу нейтрона весьма точно. Масса нейтрона оказалась равной

$$m_n = 1{,}00893 \text{ атомной единицы.}$$

Следовательно, нейтрон оказался немного более тяжёлым, чем протон. Значение этого обстоятельства будет выяснено в дальнейшем.

Ядерные превращения, совершаемые нейтронами

Могут ли нейтроны вызывать ядерные превращения? Такой вопрос уместно поставить. Ведь заранее нельзя было утверждать, что нейтроны способны вызывать ядерные превращения, а если и способны, то можно ли будет эти превращения наблюдать. Нам уже хорошо известно, что ядерные превращения происходят крайне редко. Нужно около миллиона альфа-частиц, чтобы вызвать одно ядерное превращение. Однако такого большого количества нейтронов не было в распоряжении экспериментаторов. Трудно было точно определить число возникающих нейтронов. С достаточным приближением можно было сказать, что при облучении бериллия альфа-лучами полония один нейтрон возникает приблизительно на сто тысяч альфа-частиц. Так как в распоряжении экспериментаторов находились источники, испускающие 10^9 альфа-частиц в секунду, то число нейтронов, которое мог иметь экспериментатор в своём распоряжении, было всего лишь около 10 000 в секунду. Можно ли было, имея в своём распоряжении столь малое число нейтронов, пускаться в такое трудное предприятие, как поиски ядерных превращений? Не было ли это попыткой с негодными средствами? Пожалуй, если бы Резерфорд имел в своём распоряжении источники альфа-частиц такой малой интенсивности, то расщепление ядер им не было бы обнаружено.

Однако с нейтронами дело обстоит иначе. Чтобы яснее была видна разница между нейтронами и альфа-частицами, ответим на следующий вопрос: почему альфа-частицы вызывают так редко ядерные превращения? Почему только одна альфа-частица из миллиона способна это сделать?

Напомним, что альфа-частица для того, чтобы она могла проникнуть в атомное ядро и вызвать ядерное превращение, должна обладать значительной энергией. Между тем альфа-частицы, двигаясь в каком-либо веществе, взаимодействуют не только с ядрами, но и с электронами, находящимися в атоме. Проходя через электронную оболочку атома, альфа-частица всегда теряет некоторую часть своей энергии. Правда, эта часть не очень велика. Но и вероятность того, что, проходя через какой-либо атом, альфа-частица пройдёт вблизи ядра, также невелика. Прежде чем такой удачный случай осуществится, альфа-частица должна пройти через многие атомы, в результате чего она потеряет на ионизацию либо всю свою энергию, либо столько, что для проникновения в ядро у неё уже нехватит энергии. Таков бесславный удел сотен тысяч альфа-частиц. И только те из них, которые попадут в ядро, пройдя небольшое число атомов, оказываются способными вызвать ядерное превращение.

Механизм действия нейтронов иной. Нейтроны не имеют заряда. Проходя сквозь атом, они практически не взаимодействуют с электронами, составляющими оболочку атома. Поэтому они и не теряют своей энергии. Нейтрон свободно проходит через сотни и тысячи атомов, пока не встретится с атомным ядром. Раньше ли он встретится с атомным ядром или позже — это безразлично. Каждый нейтрон обязательно, раньше или позже, встретится с атомным ядром и сможет проникнуть внутрь ядра, так как на него заряд ядра не действует. Следовательно, если нейтроны способны производить ядерные превращения, то они должны действовать весьма эффективно. И хотя нейтронов мало, может быть всего лишь тысячи, но тем не менее превращения, которые они могут вызвать, будут наблюдаемы.

Первые исследования производились с камерой Вильсона, наполненной различными газами. Изучая полученные фотографии, исследователи обнаружили на некоторых снимках вместо одиночных следов ядер отдачи двойные, а иногда и тройные вилки, которые свидетельствовали о происшедшем ядерном превращении. На рис. XVIII в конце книги приведена одна из таких фотографий. Расшифровка этого снимка дана в тексте под рисунком. Пользуясь подобными снимками, удалось показать, что нейтроны вызывают превращения в азоте, кислороде, углероде, неоне.

Вот схемы этих превращений:

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{11}_{5}B + ^{4}_{2}He,$$

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{13}_{6}C + ^{2}_{1}D,$$

$$^{16}_{8}O + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{13}_{6}C + ^{4}_{2}He,$$

$$^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He,$$

$$^{20}_{10}Ne + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{17}_{8}O + ^{4}_{2}He.$$

Особый интерес представляет реакция, обнаруженная у углерода. Напомним, что нейтроны возникают из бериллия в результате превращения, совершаемого по схеме

$$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n.$$

Превращение углерода совершается по обратной схеме:

$$^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He.$$

Рассмотренный случай представляет, следовательно, обратимое превращение. Если, как это иногда делают по аналогии с химией, назвать ядерные превращения реакциями, то мы имеем пример обратимой реакции:

$$^{9}_{4}Be + ^{4}_{2}He \rightleftarrows ^{12}_{6}C + ^{1}_{0}n.$$

В дальнейшем будет ясно, что обратимые реакции не есть какой-то особый случай, свойственный бериллию. Это свойство присуще всем ядерным превращениям. Интересно также отметить, что удалось наблюдать превращение и ядра кислорода (Резерфорд не смог вызвать превращение кислорода действием самых быстрых из имевшихся в его распоряжении альфа-частиц).

Случаи расщепления атомных ядер нейтронами были найдены на многих снимках. Предположение об эффективности нейтронов, о лёгкости проникновения их в атомные ядра подтвердилось. Вскоре, однако, Ферми произвёл опыты, которые особенно отчётливо продемонстрировали выдающуюся роль нейтронов в превращениях атомных ядер.

Прежде чем приступить к изложению этих опытов, нам придётся отвлечься в сторону и рассказать о других замечательных открытиях, которые были сделаны в том же 1932 г.

ГЛАВА V
ОТКРЫТИЕ ПОЗИТРОНА

Что такое позитрон?

В 1932 г. в журнале «Science» появилась коротенькая заметка Андерсона, в которой он сообщал об открытии им в составе космического излучения новой частицы. Эта частица имеет такую же массу, как и электрон, но в отличие от последнего обладает не отрицательным, а положительным единичным зарядом, таким же, каким обладает протон.

Открытие было столь же неожиданным, как и сделанное незадолго до этого открытие нейтрона.

Появилась новая частица, которая по своим данным — массе и заряду — относится к числу простейших частиц, являющихся, так сказать, «кирпичиками мироздания». Такие частицы часто называют «элементарными частицами»— термин, которым мы будем пользоваться в дальнейшем. Однако не надо забывать, что этот термин имеет условный характер, ибо то, что мы называем «элементарной частицей», может в действительности оказаться сложным образованием. Лишь на данном этапе наших знаний, когда ничего неизвестно о строении таких частиц, мы можем их принимать за «элементарные».

До 1932 г. мы были знакомы с двумя простейшими, т. е. элементарными, частицами — протоном, массу которого принимали за единицу (точнее, за 1,00758), и электроном, масса которого в 1836 раз меньше массы протона. Заряд обеих элементарных частиц равен по величине и противоположен по знаку. Электрон — носитель отрицательного заряда, а протон — положительного.

Правда, было не совсем ясно, к какому разряду относить альфа-частицы. Нужно ли относить их к числу элементарных частиц или считать их сложным образованием, состоя-

щим из четырёх протонов и двух электронов. С одной стороны, выдающаяся роль альфа-частиц в явлениях радиоактивности, в превращениях атомных ядер говорит как будто бы за то, что эти частицы принадлежат к числу элементарных. С другой стороны, основываясь на том, что масса и заряд альфа-частиц кратны массе и заряду других элементарных частиц, можно было думать, что альфа-частицы являются сложными образованиями, построенными из элементарных частиц.

Затем на арене физики появилась новая элементарная частица — нейтрон, обладающая массой, равной единице, но лишённая вовсе электрического заряда. «Кирпичиков мироздания» стало по крайней мере три.

И вот появилось новое известие о том, что существует ещё один тип элементарных частиц. Следует отметить, что сообщение Андерсона было опубликовано не в научном, а в научно-популярном журнале. Повидимому, сам он считал, что накопленных им данных ещё недостаточно, чтобы смело говорить о сделанном открытии. Лишь после работ Блэкетта и Оккиалини, полностью подтвердивших правильность наблюдений Андерсона, стало ясно, что новое открытие есть реальный факт. В научных кругах (да и не только в научных) громко заговорили о том, что в составе космического излучения обнаружены новые элементарные частицы, никогда ранее в земных условиях не наблюдавшиеся.

Что же такое космические лучи и как развитие этой области знания привело к открытию положительного электрона?

Космические лучи

Каждый, кто занимался изучением радиоактивности, знает, что под влиянием радиоактивного излучения заряженный электрометр или электроскоп разряжается. Причина этого вполне понятна. Под действием радиоактивного излучения в воздухе появляются ионы — электрические заряды обоих знаков. Появившиеся ионы уменьшают заряд электрометра или электроскопа. Например, если листочки электроскопа были заряжены положительным электричеством, то к этим листочкам будут двигаться отрицательные ионы. Приходя к листочкам, ионы отдают им свой отрицательный заряд, постепенно нейтрализуя положитель-

ный заряд, который был на электроскопе. Чем больше ионов образуется в воздухе, тем быстрее будет разряжаться электроскоп. Уже указывалось, что это свойство и легло в основу измерений интенсивности радиоактивных лучей.

Однако наблюдения показали, что листочки заряженного электроскопа спадают и в отсутствие радиоактивного вещества, хотя и очень медленно. Похоже было на то, что электроскоп разряжается «сам собой». Этой самопроизвольной разрядке было дано естественное на первый взгляд объяснение. Было высказано мнение, что всюду на земле в чрезвычайно рассеянном виде находятся радиоактивные вещества. Гамма-излучение этих веществ, способное распространяться на большие расстояния, и является причиной того, что повсюду у поверхности земли (и воды) происходит, правда, незначительная, ионизация воздуха, которая и вызывает «самопроизвольную» разрядку всяких заряженных тел. Однако в 1910 г. было обнаружено, что по мере удаления вверх от поверхности Земли скорость разрядки электрометра увеличивается. Согласно высказанному выше предположению следовало бы ожидать, что с удалением от поверхности земли интенсивность гамма-излучения будет падать, а с ней должна уменьшаться и скорость разрядки электрометра. Между тем опыты показывали, что дело обстоит не так. По мере поднятия вверх интенсивность ионизации заметно росла.

Для изучения этого вопроса немецкий физик Гесс совершил около десятка подъёмов на воздушном шаре на высоту до 5 *км*. Увеличение ионизации, по его данным, становилось заметным, начиная с 400 метров.

Основываясь на проведённых опытах, Гесс выдвинул гипотезу о том, что на нашу планету из мирового пространства приходят лучи, способные производить ионизацию. Эти лучи частично поглощаются атмосферой, окружающей нашу Землю, поэтому они достигают поверхности Земли в значительной мере ослабленными. Когда же мы поднимаемся вверх, то мы переходим в области, где их интенсивность делается большей. Это и является причиной увеличения интенсивности ионизации и увеличения быстроты разрядки электрометра.

Как выяснилось впоследствии, эти лучи не выходят из какой-либо точки мирового пространства. Они приходят

на Землю повсюду, как в той её стороне, которая обращена к Солнцу, так и в противоположной. Эти лучи присутствуют в равной мере и днём и ночью.

Гесс назвал эти лучи космическими. Природой космического излучения заинтересовались многие учёные, и в годы, последовавшие за его работами, появилось много исследований, посвящённых космическим лучам. Все эти исследования заключались в сущности в изучении поглощения космических лучей, однако это изучение шло несколькими путями. С одной стороны, изучалось изменение интенсивности космического излучения (изменение интенсивности ионизации) с высотой. Для этого стремились поднять измерительные приборы на возможно бо́льшую высоту. С другой стороны, исследовалось поглощение космических лучей на самой поверхности Земли. С этой целью погружали измерительные приборы в воду (озёра, моря) и старались при этом достигнуть возможно бо́льших глубин. Наконец, исследовалось и изменение интенсивности космического излучения (за меру её мы принимаем интенсивность ионизации, производимой космическим излучением) после прохождения различных веществ (железа, свинца и др.).

Среди исследований изменения интенсивности космического излучения с высотой следует отметить опыты с шарами-зондами. Это — шары, снабжённые прибором, который мог автоматически через определённые промежутки времени записывать ионизацию воздуха, время, температуру и давление воздуха, которое было в этот момент. Совокупность трёх последних данных позволяла определять высоту, на которой производилось измерение ионизации воздуха.

Чтобы достигнуть возможно бо́льших высот, стремились сделать прибор максимально лёгким. Вес его составлял всего лишь 1,5 *кг*. В 1932 г. шар-зонд достиг высоты в 27 *км*, а в 1933 г. — 35 *км*. Полученная в результате этих измерений зависимость интенсивности космического излучения от высоты изображена на рис. 17.

Существенное улучшение в методике измерения при помощи шаров-зондов было сделано С. Н. Верновым. Он снабдил шары-зонды радиоаппаратурой, передающей на землю сигналы от приборов, регистрирующих космическое излучение. Это дало возможность определять показания приборов, регистрирующих космические лучи, непосредственно

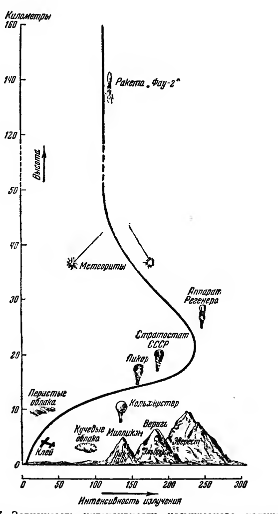


Рис. 17. Зависимость интенсивности космического излучения от высоты. На рисунке показано, кто и каким способом достиг высоты, на которой производилось измерение интенсивности космических лучей.

при подъёме шара и его полёте и исключило многие неудачи, обусловленные пропажей шаров.

Если на поверхности Земли совместным действием космического и радиоактивного излучений в одном кубическом сантиметре воздуха каждую секунду образуется в среднем одна пара ионов, то на высоте в 2 *км* образуется 5,6 пары ионов. По мере дальнейшего поднятия число образующихся пар ионов быстро растёт. Однако, начиная с 15 *км*, темп возрастания ионизации замедляется, а при 22 *км* ионизация достигает максимального значения, равного 240 парам ионов на кубический сантиметр в секунду. При подъёме на бо́льшие высоты наблюдается уменьшение ионизационного тока. На высоте 35 *км* ионизационный ток соответствует образованию в одном кубическом сантиметре всего лишь 175 пар ионов в секунду.

Измерение интенсивности космического излучения с помощью шаров-зондов производилось лишь до высоты 35 *км*. Исследование на больших высотах производилось при помощи ракет. В 1948 г. при помощи ракеты «Фау-2» была измерена интенсивность космического излучения на высотах до 160 *км*. Измерение производилось счётчиком Гейгера. Число импульсов в счётчике изменялось от 1,3 до 50 по мере поднятия ракеты с уровня моря до высоты 20 *км*. По мере поднятия на высоту 50 *км* число импульсов падало до 22 и при дальнейшем поднятии ракеты не изменялось.

Итак, интенсивность космической радиации имеет максимум на высоте, приблизительно равной 22 *км*, а на высоте, большей 50 *км*, интенсивность космических лучей постоянна. Значение этого весьма важного факта будет разъяснено ниже.

Интенсивность космического излучения удалось промерить и на значительных глубинах под водой. Впервые такие измерения были сделаны советским физиком Л. В. Мысовским. В дальнейшем самозаписывающие автоматы спускались под воду на глубину до 1000 *м*. По мере погружения в воду интенсивность космического излучения падала. Однако даже на глубине 1000 *м* можно было обнаружить наличие космического излучения, правда, весьма малой интенсивности. Следовательно, космические лучи могут пройти не только через атмосферу нашей Земли, но также и через слои воды в несколько сот метров толщиной.

Сопоставление данных о поглощении космических лучей в воде, в железе и в свинце показало, что все вещества поглощают космические лучи одинаково, если только толщины поглощающих слоёв взяты такими, чтобы вес столба вещества, стоящего на пути космических лучей, был одним и тем же. Это значит, что слой воды в 1 *м*, имеющий вес 100 *г/см*², будет поглощать космические лучи так же, как слой железа толщиной в 12,8 *см* или как слой свинца толщиной в 8,7 *см*. У этих слоёв вес также равен 100 *г/см*². Поглощение космических лучей нашей атмосферой эквивалентно поглощению водяного столба длиной 10,3 *м*.

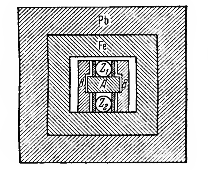
Коэффициент поглощения космических лучей очень мал. Слой свинца толщиной около 20 *см* уменьшает интенсивность космических лучей всего лишь наполовину.

Подобно рентгеновским и гамма-лучам космические лучи обладают способностью проходить через значительные толщи металла, с той только разницей, что проникающая способность космических лучей более велика, чем у самых жёстких гамма-лучей.

Долгое время учёные считали, что природа космических лучей такая же, как и природа гамма-лучей, т. е. что они являются такими же электромагнитными колебаниями, как световые лучи или лучи Рентгена. Хорошо было известно, что проникающая способность рентгеновских и гамма-лучей зависит от энергии. Чем больше энергия этих лучей, тем меньше они поглощаются. Так как космические лучи поглощаются значительно меньше гамма-лучей, то можно было заключить, что их энергия превосходит энергию всех известных гамма-лучей. По коэффициенту поглощения было найдено, что если космические лучи по своей природе аналогичны гамма-лучам, то энергия кванта космического излучения должна быть равна примерно 30 000 000 электрон-вольт,— столько же, сколько должно было бы выделиться при образовании ядра гелия из четырёх протонов и двух электронов. На этом основании Милликэн предположил, что космические лучи являются результатом образования ядер гелия в мировом пространстве, откуда эти лучи и приходят на Землю.

Точка зрения Милликэна была весьма популярной до тех пор, пока Ботэ и Кольхёрстер не обнаружили, что она не соответствует действительности. В своих опытах они исполь-

зовали для регистрации космических лучей не ионизационную камеру, соединённую с электрометром, а счётчик Гейгера-Мюллера, который, как мы уже знаем, регистрирует каждую отдельную заряженную частицу, проходящую через него. Они применили не один счётчик, а два (Z_1 и Z_2), расположенных один над другим на некотором расстоянии (рис. 18). Между счётчиками можно было помещать фильтры A из различных веществ. Экраны из свинца и железа имели своим назначением защитить счётчик от действия радиоактивного излучения окружающих предметов. Таким способом можно было точно измерить коэффи-



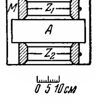


Рис. 18. Схема опытов Ботэ и Кольхёрстера.
Z_1 и Z_2 — счётчики Гейгера-Мюллера; A — фильтр толщиной 4,1 *см*, сделанный из золота; B и M — свинцовые фильтры для защиты от рассеянного излучения.

циент поглощения космических лучей в веществе A. С этой целью показания обоих счётчиков регистрировались автоматически самопишущим прибором на одной ленте. На верхней половине ленты записывались показания одного счётчика, на нижней половине — второго. При просмотре записи показаний счётчиков на ленте было обнаружено, что в очень большом числе случаев показания обоих счётчиков совпадают. Счётчики как бы одновременно показывают появление космической частицы. Это было странно. Ведь если космические лучи представляют собой такие же кванты, как и рентгеновские лучи, действие которых проявляется в том, что они создают электроны значительной

энергии, причём каждый квант может создать лишь один электрон, то ясно, что вторичные заряженные частицы — быстрые электроны — не могли возникать одновременно в обоих счётчиках. Одновременное действие счётчиков могло быть следствием лишь того, что через оба счётчика проходила одна и та же заряженная частица (электрон), которая производила ионизацию на всём своём пути, т. е. в обоих счётчиках. Поэтому опыты Ботэ и Кольхёрстера могли быть объяснены только так: заряженные частицы, отмечаемые счётчиками, не есть вторичные электроны, возникающие от действия космических квантов в стенках счётчика, а в составе самого космического излучения есть заряженные частицы, которые обладают огромной энергией, достаточной для того, чтобы пройти через оба счётчика и ещё через фильтр золота толщиной в 4,1 *см* между ними. Коэффициент ослабления частиц, создающих ионизацию в обоих счётчиках, оказался равным коэффициенту поглощения космических лучей, измеренному ранее с помощью ионизационной камеры. Это обстоятельство имеет большое значение. Можно было думать, что ионизирующие частицы, регистрирующиеся в установке, присутствуют в составе космического излучения только в некотором количестве. Однако совпадение измеренных коэффициентов поглощения ионизирующих частиц с коэффициентом поглощения всего космического излучения заставило Ботэ и Кольхёрстера считать, что всё космическое излучение состоит из заряженных ионизирующих частиц. Если предположить, что все эти частицы — электроны, то их энергия должна была бы быть больше 100 000 000 электрон-вольт.

Опыты Ботэ и Кольхёрстера были повторены Росси. В своих опытах он использовал новую методику, которая нашла широкое применение в дальнейших исследованиях космических лучей. Сущность его методики заключалась в использовании для регистрации космических лучей трёх счётчиков Гейгера-Мюллера, располагавшихся по прямой линии и включённых в довольно сложную усилительную схему. По этой схеме импульс, возникший в счётчике при прохождении через него заряженной частицы, усиливался до определённой величины. Импульсы от всех трёх счётчиков передавались ещё к одной усилительной лампе, через которую проходил большой ток, только в том случае, если

к ней приходили импульсы сразу от всех трёх счётчиков. Реле механического нумератора срабатывало только в том случае, если через эту лампу проходил большой ток. Такая схема, следовательно, отмечала только случаи одновременного срабатывания всех трёх счётчиков сразу. Очевидно, что одновременное срабатывание всех трёх счётчиков могло иметь место только тогда, когда одна и та же ионизирующая частица проходила через все три счётчика. Схема включения счётчиков, предложенная Росси, получила название «схемы совпадения».

В качестве фильтра (поглотителя) для космических лучей Росси применил свинец, толщина которого в процессе опытов изменялась и доводилась до 1 *м*. Расположение счётчиков и свинцовых фильтров в опытах Росси изображено на рис. 19. С указанным расположением было произведено измерение зависимости числа частиц, прошедших через все три счётчика, от толщины свинцового фильтра. Измерения Росси подтвердили, что космические лучи у поверхности Земли представляют собой поток ионизирующих частиц, вызывающих разряд в нескольких счётчиках, через которые они проходят. Вместе с тем опыты Росси позволили сделать и новые, весьма важные выводы. Оказалось, что космическое излучение неоднородно и состоит по крайней мере из двух частей. Одна из них характеризуется большим коэффициентом поглощения. Эти лучи поглощаются сравнительно небольшой толщиной вещества (5—10 *см* свинца). Их назвали «мягкой» компонентой кос-

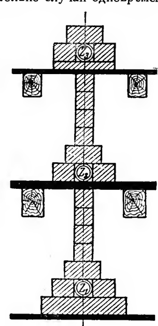


Рис. 19. Схема опытов Росси. Z_1, Z_2, Z_3 — счётчики Гейгера-Мюллера, расположенные на одной прямой. Косая штриховка — свинец, чёрные прямоугольники — железо.

мического излучения. Другая часть космических лучей, не поглощаемая 10 *см* свинца, называется «жёсткой» компонентой. Если бы частицы, составляющие эту часть космических лучей, были электронами, то их энергия, по предположению учёных, превосходила бы 1 миллиард электронвольт.

Опыты Скобельцына

Очень скоро предположение Ботэ и Кольхёрстера было подтверждено прямыми опытами советского учёного Д. В. Скобельцына. Изучая взаимодействие гамма-лучей с электронами, составляющими оболочку атомов, Скобельцын с целью определения энергии образующихся при этом электронов поместил камеру Вильсона в сравнительно сильное магнитное поле. Его идея состояла в следующем.

В магнитном поле электроны движутся не прямолинейно, а по окружностям, радиусы которых зависят от кинетической энергии электронов. Следовательно, в камере Вильсона, помещённой в магнитном поле, траектории электронов, образующихся под действием гамма-лучей, будут окружностями. Радиусы этих окружностей и будут служить мерой энергии электронов. Чем больше энергия электронов, тем больше и радиус окружности.

Методика, предложенная и осуществлённая Скобельцыным, явилась серьёзным улучшением арсенала средств, применяемых для изучения как ядерных процессов, так, особенно, и космических лучей. Наблюдая в камере Вильсона, помещённой в магнитное поле, пути электронов, созданных гамма-лучами, он видел обычно эти пути в виде дуг разного радиуса кривизны. Источник гамма-лучей помещался возле камеры.

Тщательно измеряя радиусы кривизны траекторий, Скобельцын определял энергию электронов и смог сделать ряд важных заключений, касающихся как механизма взаимодействия гамма-лучей с электронами атомов, так и энергии электронов.

Однако наибольший интерес к работе Скобельцына вызвало обнаружение им на фотографиях вильсоновской камеры совершенно не искривлённых следов электронов. По характеру следа, по ионизации, производимой движущейся частицей, было совершенно очевидно, что мы имеем дело с

электроном, но только этот электрон не хотел искривлять свой путь, несмотря на наличие сильного магнитного поля. Скобельцын сразу же сделал правильное заключение. Он решил, что эти прямолинейные следы также представляют собой дуги окружностей, однако, радиус этих окружностей так велик, что на пути, умещающемся в пределах камеры Вильсона, не заметно никакого искривления следов. По его подсчётам энергия электронов, движущихся по таким окружностям, должна быть не меньше миллиарда электрон-вольт. Не могло быть никакого сомнения в том, что такие электроны никак не связаны с гамма-лучами радиоактивных веществ, применявшихся в его опытах. В этом Скобельцын убедился и прямым путём. Он убрал радиоактивный источник и стал производить снимки «пустой» камеры Вильсона, находящейся в магнитном поле, напряжённость которого была равна 1500 эрстед.

Как он и ожидал, на фотографиях «пустой» камеры действительно обнаружились прямолинейные следы электронов, путь которых магнитное поле в 1500 эрстед не смогло искривить. На 1700 фотографических снимках Скобельцын зарегистрировал около 200 таких следов. Было совершенно ясно, что эти следы в камере Вильсона принадлежат заряженным ионизирующим частицам космического излучения, пролетающим сквозь камеру. Замечательно также и то, что на фотографиях Скобельцына сравнительно часто наблюдались не одиночные следы, а парные, иногда даже тройные, а один раз была замечена четвёрка следов сразу. Так как снимки камеры Вильсона, производившиеся Скобельцыным, были стереоскопическими, то можно было ясно видеть, что эти следы вовсе не случайно попадают на одну фотографию, а что все эти двойки, тройки и четвёрки связаны между собой. Если продолжить эти следы назад, то оказывается, что все они пересекаются между собой в одной точке, расположенной обычно где-то недалеко от камеры Вильсона, чаще всего вблизи предметов, окружающих камеру.

Создавалось впечатление, что наблюдавшиеся Скобельцыным следы имеют «земное» происхождение, что сами они не есть «космические лучи», а создаются в результате взаимодействия каких-то космических частиц с нашей земной средой. Так возник важный для понимания природы космических лучей вопрос: являются ли быстрые заряженные

частицы действительно космическими частицами или все они имеют вторичное происхождение. Может быть, все они — просто электроны, которые выбиваются космическими лучами из атомов вещества. Это предположение было тем более законным, что, как мы уже знаем, космические лучи, проходя через земную атмосферу, сильно поглощаются. Могло бы, например, случиться, что собственно космические лучи, приходящие к нам из мирового пространства, представляют собой всё-таки короткие электромагнитные волны типа гамма-лучей, заряженные же частицы — электроны вторичного происхождения, такие же, как и те, что наблюдал Скобельцын, когда помещал в камеру Вильсона источник гамма-лучей, только эти вторичные электроны имеют громадную энергию, в тысячи раз бо́льшую, чем энергия электронов, производимых гамма-лучами от какого-либо естественно-радиоактивного вещества. А это в свою очередь значило бы, что энергия космических лучей в тысячи раз больше энергии обычных гамма-лучей. Предположение, что значительная часть электронов, наблюдаемых в космических лучах, имеет «земное происхождение», находит подтверждение в том факте, что на больших высотах (свыше 22 *км*) ионизация, производимая космическими лучами (рис. 17), меньше, чем на небольших высотах. Это означает, что часть вторичных ионизирующих частиц действительно зарождается в земной атмосфере.

Правда, могло оказаться, что и сами космические лучи — тоже заряженные частицы (может быть, те же электроны громадных энергий). При прохождении этих частиц через земную атмосферу, а также при взаимодействии с телами, находящимися на поверхности земли, могут возникать и вторичные электроны. Поэтому среди следов, обнаруженных Скобельцыным в камере Вильсона, могли быть и такие, которые принадлежали самим космическим частицам.

Как можно было выяснить, являются ли и первичные космические лучи заряженными частицами?

Ответ очень простой. Надо повторить опыты Скобельцына в громадном масштабе,— поместить первичные космические лучи в магнитное поле ещё до того, как они войдут в земную атмосферу, и проверить, будут ли они этим полем отклоняться. Если они отклонятся магнитным полем, значит, эти частицы заряжены, если магнитное поле их отклонять не

будет, значит, космические частицы заряда не имеют. Но как создать такое поле? К счастью, такого поля создавать и не надо. Оно уже есть. Это — наше земное магнитное поле. Правда, это поле слабое: напряжённость его не тысячи эрстед, а всего лишь доли эрстеда, но зато действие этого магнитного поля простирается на громадное пространство, а мы хорошо знаем, что степень отклонения в магнитном поле определяется произведением напряжённости магнитного поля на величину пути, пройдённого частицей в этом поле. Слабое поле, действующее на большом пути, может вызвать изменение траектории даже бóльшее, чем сильное поле, действующее на коротком пути. Земное поле недостаточно, чтобы заряженные частицы очень большой энергии испытали заметное изменение своего движения на коротком пути. Но оно может оказаться вполне достаточным, чтобы весьма сильно отклонить частицы от их прямолинейного пути ещё до прихода в земную атмосферу.

Вопросом о том, как движутся электроны в магнитном поле Земли, учёные интересовались уже давно в связи с теорией северных сияний. Были произведены соответствующие расчёты и даже проделаны опыты, демонстрирующие поведение электронов, проходящих вблизи намагниченного шарика. И расчёты, и опыты дали один и тот же результат: заряженные частицы под влиянием магнитного поля намагниченного шара искривляют свои траектории, притягиваясь к его магнитным полюсам.

Совершенно аналогичное действие должно оказывать магнитное поле Земли и на космические лучи, если только они представляют собой поток заряженных частиц. Космические лучи должны тогда стремиться к магнитным полюсам, благодаря чему интенсивность космического излучения на полюсе (географический полюс близок к магнитному) должна быть большей, чем на экваторе. Возникла необходимость исследовать интенсивность космического излучения в различных точках земной поверхности с тем, чтобы выяснить, как эта интенсивность меняется с широтой.

В 1933 г. были подведены итоги работы многочисленных экспедиций по измерению интенсивности космического излучения в различных географических широтах. Измерения показали, что на экваторе интенсивность космического излучения заметно меньше, чем в высоких широтах.

Стало ясным что первичные, так сказать, действительно космические частицы, являются (по крайней мере в некоторой своей части) заряженными частицами, следовательно, некоторые из обнаруженных Скобельцыным на вильсоновских фотографиях прямолинейных следов могли принадлежать самим космическим частицам.

Что же это за частицы? Какова их энергия, масса, заряд?

Дать ответ на эти вопросы можно было только в том случае, если бы удалось отклонить их магнитным полем. Но мы уже видели, что поле в 1500 эрстед, применённое Скобельцыным, было недостаточным для их отклонения. Значит, надо было испытать действие значительно более сильных магнитных полей.

Как был открыт позитрон

За эту задачу взялись независимо друг от друга Кунце и Андерсон. Громадными катушками они создавали в большом объёме магнитное поле в 20 000—25 000 эрстед, в которое и помещалась камера Вильсона.

Такое мощное поле оказало своё действие, и многие из электронных следов, которые на снимках Скобельцына выглядели прямыми линиями, в камерах Кунце и Андерсона получили заметную кривизну.

Совершенно неожиданным оказалось, однако, что не все траектории частиц искривлялись магнитным полем в одном и том же направлении. Некоторые из частиц отклонялись в одну сторону, а другие — в противоположную. При этом одни отклонялись так, как это сделали бы при движении в магнитном поле электроны, т. е. частицы, заряженные отрицательным электричеством. Другие же отклонялись так, как если бы их заряд был положительным (рис. XIX в конце книги). Кунце, а в начале и Андерсон считали, что одни из этих частиц — электроны, а другие, заряженные положительно, повидимому, протоны, хотя по характеру ионизации как положительно, так и отрицательно заряженные частицы были весьма похожи.

По степени искривления траектории можно было вычислить энергию этих частиц. Эта энергия оказалась у разных частиц неодинаковой. Бóльшая часть из них имела энергию

порядка миллиарда электрон-вольт, хотя некоторые из частиц имели энергию, ещё в несколько раз бо́льшую.

Вопрос об интерпретации путей частиц в камере Вильсона чрезвычайно сильно занимал Андерсона. Всегда считалось, что частица движется сверху вниз, но ведь могло быть и так, что частицы движутся снизу вверх. Если бы это случилось, то все наши заключения о знаке заряда были бы неправильными. Ведь искривление пути в данном магнитном поле у частицы, заряженной отрицательно, будет такое же, как и у частицы, заряженной положительно, но движущейся в противоположном направлении. Поэтому, строго говоря, по виду следа в камере Вильсона мы ещё не можем сказать, заряжена ли частица, создавшая его, положительно или отрицательно. Однозначное заключение о знаке заряда частицы может быть сделано только в том случае, когда нам известно также и направление движения частицы.

Как же определить направление движения космической частицы, след которой мы видим в камере Вильсона?

Остроумное решение этой задачи было дано Андерсоном. Он решил перегородить пространство внутри камеры Вильсона достаточно толстой свинцовой пластиной (толщина пластины 5 *мм*). Если частица пройдёт через эту пластину (а мы знаем, что космические лучи проходят через весьма значительные слои вещества), то её первоначальная энергия уменьшится; вследствие этого после прохождения пластины уменьшится и радиус кривизны траектории частицы. Таким образом, зафиксировав при помощи фотографической пластинки движение частицы сквозь слой свинца и сравнив кривизну траектории до вступления в слой свинца и после выхода из него, мы можем сказать, с какой стороны эта частица вошла в свинцовую пластину, т. е., иными словами, определить направление её движения. Это в свою очередь позволило бы сделать окончательное заключение о знаке заряда частицы и надёжно определить таким путём наличие или отсутствие положительно заряженных частиц в составе космического излучения.

Получив ряд фотографий, Андерсон скоро нашёл на них и такие следы, которые отклонялись не так, как обычные электроны. Изучая один из таких снимков, он обнаружил поразительную вещь: на этом снимке (рис. XX в конце книги) виден след движения заряженной частицы, прошедшей

через свинцовую перегородку. В верхней части камеры над перегородкой траектория частицы искривлена значительно меньше, чем в нижней. Следовательно, в верхней части камеры частица двигалась с большей скоростью, чем в нижней. Это значит, что частица, след которой представлен на рис. XX, двигалась сверху вниз.

Зная направление движения частицы и направление магнитного поля, можно определить, в какую сторону отклоняется частица под влиянием магнитного поля, а следовательно, установить знак её заряда. Оказалось, что частица заряжена положительно. Вначале Андерсон подумал, что это — протон. Так как кривизна траектории значительна, то можно было измерить радиус кривизны. Знание этой величины очень важно, ибо, зная массу, можно по значению радиуса кривизны и величине магнитного поля определить энергию частицы. Измерения привели к следующему выводу: если это — след протона, то его энергия после прохождения свинцовой пластины должна быть равной всего лишь 300 000 электрон-вольт. Как только был получен этот результат, Андерсону сразу стало ясно, что рассматриваемая частица не может быть протоном.

Во-первых, протоны такой энергии имеют пробег не более 5 *мм*. Между тем измеренная по фотографии длина следа составила более 50 *мм*. Во-вторых, ионизирующая способность протонов такой энергии чрезвычайно велика, поэтому след должен быть «жирным», между тем по внешнему виду он не отличался от следов электронов. Можно было прямо утверждать, что ионизирующая способность этой частицы такая же, как и у электронов.

Сопоставляя ионизирующую способность частицы, длину её траектории и радиус кривизны, Андерсон пришёл к заключению, что масса этой частицы, заряженной положительно, должна быть приблизительно равна не массе протона, а массе электрона.

Частица, след движения которой Андерсон наблюдал в камере Вильсона, имела массу электрона, но была заряжена *положительно*. Это был новый вид частиц, которых наука до того времени не знала. Их назвали положительными электронами, или «позитронами».

Чтобы закончить разбор снимка, приведённого на рис. XX, нам остаётся только сообщить, что энергия позит-

рона до вхождения в свинцовую пластину оказалась равной 63 миллионам электрон-вольт, а по выходе из пластины позитрон имел всего лишь 23 миллиона электрон-вольт. 40 миллионов электрон-вольт позитрон потерял во время прохождения через свинцовую перегородку.

После этих работ изучением свойств позитронов начали заниматься многие учёные.

«Рождение и смерть» электронов

Позитроны впервые были обнаружены Андерсоном в составе космического излучения. Очень скоро, однако, выяснилось, что они могут возникать и в земных условиях, например порождаться гамма-лучами, и что для этого нужны сравнительно небольшие энергии — 1 миллион электрон-вольт. Кроме того, оказалось, что позитроны играют немалую роль и в ядерных превращениях: при их помощи было, например, открыто так называемое явление искусственной радиоактивности. Об этом открытии мы расскажем в главе VII, а сейчас перейдём к изложению опытов, раскрывших замечательные свойства новых частиц — позитронов.

С момента открытия рентгеновских лучей учёные занимались исследованием их поглощения в различных средах. Явление поглощения рентгеновских лучей нашло большое применение в технике и медицине и имело важное научное значение. Поэтому необходимо было тщательно изучить законы, управляющие этим явлением. В результате многочисленных исследований был установлен механизм поглощения рентгеновских лучей. Было найдено, что эти лучи поглощаются в атомах вещества. Энергия кванта рентгеновских лучей передаётся какому-либо из электронов, входящих в оболочку атома, чаще всего одному из электронов, находящихся в слое K, а сам квант при этом исчезает.

Были установлены также и количественные соотношения, определяющие изменение поглощения рентгеновских лучей в зависимости от энергии кванта (частоты рентгеновских лучей) и от вещества поглотителя. Законы поглощения рентгеновских лучей были распространены на весь диапазон частот, которые можно было получить с применявшейся тогда техникой генерирования этих лучей. При помощи кван-

товой механики удалось рассчитать поглощение рентгеновских лучей: были получены формулы, хорошо совпадающие с опытными данными и позволившие распространить полученные закономерности на бо́льший диапазон частот, т. е. на лучи с бо́льшей энергией квантов.

Поскольку природа гамма-излучения идентична природе рентгеновских лучей (гамма-лучи отличаются от рентгеновских лучей только энергией квантов), естественно было думать, что и механизм поглощения их различными веществами будет таким же, как у рентгеновских лучей, и что количественные закономерности, например зависимость поглощения от энергии, для гамма-квантов и для рентгеновских лучей будут выражаться одной и той же формулой.

Произведённые исследования в общем подтвердили это предположение. Оказалось, что поглощение гамма-лучей подчиняется тем же законам, что и поглощение рентгеновских лучей. Однако эта общность законов поглощения имеет место только в том случае, если энергия кванта гамма-лучей не превосходит 1 миллиона электрон-вольт. Когда стали исследовать поглощение гамма-лучей бо́льших энергий, то выяснилось, что кроме обычного фотоэлектрического поглощения *) для гамма-лучей с энергией, бо́льшей 1 миллиона электрон-вольт, существует ещё дополнительное поглощение. Гамма-лучи таких энергий поглощаются сильнее, чем это следует из законов фотоэлектрического поглощения.

Было установлено, что это дополнительное поглощение возрастает с увеличением энергии кванта гамма-лучей. Оно также оказалось при данной энергии кванта тем большим, чем больше был атомный номер поглощающего вещества. Объяснение этому явлению, обнаруженному задолго до открытия позитрона и получившему название аномального поглощения гамма-лучей, долго не удавалось найти. Лишь после открытия позитронов выяснилась неизбежность такого характера поглощения гамма-лучей.

Аномальное поглощение гамма-лучей оказалось связанным с возникновением позитронов. Для выяснения этого обстоятельства наблюдалось поглощение гамма-лучей в свинцовых фильтрах в камере Вильсона. С этой целью

*) Поглощение кванта одним из электронов оболочки атома называется фотоэлектрическим поглощением.

внутрь камеры Вильсона помещалась свинцовая пластина, а затем производился ряд снимков, на которых регистрировались частицы, возникающие в этой пластине при облучении её гамма-лучами. Для анализа заряда возникающих при этом частиц камера Вильсона помещалась в магнитное поле. На многих произведённых снимках были обнаружены следы позитронов. На рис. XXI в конце книги изображена одна из таких фотографий, на которой виден след позитрона, возникшего под действием гамма-лучей в свинцовой пластине. На некоторых снимках были обнаружены следы двух частиц, возникающих в одной точке. Эти частицы всегда отклонялись магнитным полем в разные стороны, следовательно, заряды их были разного знака.

По ионизирующей способности этих частиц можно было заключить, что они имеют одинаковую массу, равную массе электрона, т. е., иными словами, наблюдаемые частицы являлись электроном и позитроном.

Итак, при действии гамма-лучей с энергией выше 1 миллиона электрон-вольт наблюдается возникновение позитронов. Возникновение позитронов происходит всегда в виде появления двух частиц или, как говорят, «пары» — электрона и позитрона. То, что при облучении свинцовых пластин в камере Вильсона часто наблюдается след только одной частицы — позитрона или электрона — объясняется тем, что другая частица, отклоняемая магнитным полем в противоположном направлении, застревает внутри свинцовой пластины.

Исследования вильсоновских фотографий, снятых при прохождении гамма-лучей через тонкие фольги и через газообразную среду, подтвердили, что позитрон всегда возникает как составная часть пары частиц — электрона и позитрона. Образование пар гамма-лучами в различных газах в камере Вильсона было детально исследовано рядом учёных, в том числе советскими физиками Л. В. Грошевым и И. М. Франком. Одна из полученных при этом фотографий изображена на рис. XXII в конце книги.

Наблюдение на вильсоновских фотографиях пар, образованных гамма-лучами, позволило сделать ещё один важный вывод. Пары наблюдаются в камере Вильсона, помещённой в магнитном поле. Но в магнитном поле, как мы знаем, заряженные частицы движутся по окружностям,

радиус которых зависит от энергии частицы. Следовательно, по отклонению обеих частиц, составляющих пару, можно определить их энергию. Точные количественные опыты были произведены с гамма-лучами, испускаемыми торием С″. Этот радиоактивный препарат был выбран потому, что энергии испускаемых им гамма-квантов были хорошо известны. Существенным было то, что в составе излучения тория С″ был только один сорт гамма-лучей, способных образовывать позитроны. Энергия их квантов равнялась 2,6 миллиона электрон-вольт.

Измерения кривизны траекторий, описываемых электроном и позитроном, показали, что суммарная энергия обеих частиц во всех случаях имеет величину, равную 1,6 миллиона электрон-вольт. Если учесть, что собственная энергия, связанная с массой частицы, как для электрона, так и для позитрона равна приблизительно 0,5 миллиона электрон-вольт, то станет ясным, что вся энергия гамма-кванта тория С″ перешла к электрону и позитрону.

Итак, при образовании пары квант гамма-лучей исчезает — поглощается. Его энергия частично переходит в кинетическую энергию частиц, образующих пару (1,6 миллиона электрон-вольт), а частично (1 миллион электрон-вольт) идёт на образование самой пары. Величина энергии, необходимой для образования пары, определяется величиной массы частиц, образующих пару. Процесс образования пары может быть записан так:

$$\left.\begin{array}{c}\text{гамма-квант} \rightarrow \text{электрон} + \text{позитрон},\\ \text{или} \quad \gamma \rightarrow e^{-} + e^{+},\end{array}\right\} \qquad (9)$$

где e^- — электрон, e^+ — позитрон, а γ — квант гамма-лучей.

Так как на образование пары необходимо затратить энергию в 1 миллион электрон-вольт, то понятно, почему аномальное поглощение гамма-лучей начинает наблюдаться только тогда, когда энергия кванта гамма-лучей становится больше 1 миллиона электрон-вольт.

Позитроны могут рождаться не только в результате действия гамма-лучей, но также и под действием электронов большой энергии.

Тщательное изучение механизма и законов образования позитронов было проведено советским учёным А. И. Али-

хановым и его школой. Очень остроумными и точными опытами им удалось показать, что количественные соотношения, определяющие вероятность рождения позитронов, совпадают с большой точностью с расчётами, произведёнными на основе квантовой механики.

Согласно выводам теории в процессе превращения гамма-лучей в пару — позитрон и электрон — должно участвовать какое-либо третье тело. Обычно эту роль играет атомное ядро. При этом само оно нисколько не изменяется, но его присутствие необходимо, чтобы гамма-лучи могли образовать пару. Более того, чем больше заряд ядра, тем более вероятным оказывается превращение гамма-кванта в элекрон и позитрон. Именно вследствие этого аномальное поглощение гамма-лучей возрастает с увеличением атомного номера поглотителя.

Поскольку позитроны могут зарождаться в земных условиях, естественно возникает вопрос, почему же мы не наблюдали их ранее. Оказалось, что позитроны недолговечны и существуют только до тех пор, пока обладают большой кинетической энергией. Медленно движущийся или остановившийся позитрон взаимодействует с электронами того вещества, в котором тормозится, в результате чего электрон и позитрон *исчезают*. Однако исчезают они не бесследно: при этом возникают два кванта гамма-лучей, разлетающихся в противоположных направлениях, каждый из которых имеет энергию около 0,5 миллиона электрон-вольт. Этот процесс может быть записан так:

$$\text{позитрон} + \text{электрон} \longrightarrow 2\ \text{гамма-кванта}. \qquad (9a)$$

Открытие образования и исчезновения пар произвело на учёных не меньшее впечатление, чем в своё время открытие радиоактивности. Как до открытия радиоактивности они считали атомы вещества неизменными и неделимыми, существующими вечно, так и заряженные частицы (электроны) они привыкли считать постоянно существующими, не создающимися и никогда не исчезающими. Электроны, по мнению физиков, могли только переходить от одного тела к другому, перенося при этом свой заряд. Иногда электроны могли оказаться свободными, но во всех случаях при всех явлениях и процессах число их считалось постоянным. И вот оказалось, что это не так: электроны могут исчезать,

происходит как бы уничтожение электронов (и, конечно, позитронов), сопровождающееся возникновением гамма-квантов; электроны могут также и возникать за счёт исчезновения гамма-квантов.

Опыты по зарождению и исчезновению позитронов и электронов разрушили, таким образом, ещё одно из предубеждений, существовавших у естествоиспытателей — о неизменности электронов и блестящим образом подтвердили положение диалектического материализма о взаимной превращаемости различных форм материи.

ГЛАВА VI

ИСКУССТВЕННОЕ ПРЕВРАЩЕНИЕ АТОМНЫХ ЯДЕР

В главе IV мы подробно осветили опыты Резерфорда и его учеников по искусственному преобразованию атомных ядер. Однако слово «искусственный», применяемое для характеристики этих опытов, нуждается в некоторой оговорке. Употребление его применительно к опытам Резерфорда имело своей целью подчеркнуть, что превращение ядер происходило не само собой, а являлось в известной мере «делом рук экспериментатора». В действительности искусственное превращение атомных ядер в этих опытах не есть в полной мере дело рук экспериментатора. Ведь в них пришлось пользоваться в качестве снарядов альфа-частицами, которые сами являются продуктом естественного распада атомных ядер. Понятно, конечно, что у экспериментаторов существовало желание обойтись без радиоактивности,— производить в полной мере искусственное превращение, в котором в качестве снарядов, обстреливающих ядра, применялись бы не альфа-частицы от естественно-радиоактивных веществ, а частицы (ядра гелия, ядра водорода), которым в лаборатории искусственно сообщили большую энергию.

Уже из опытов по превращению атомных ядер при помощи альфа-частиц стало ясно, что для производства ядерных превращений надо иметь в своём распоряжении частицы с энергией в несколько миллионов электрон-вольт. Такая энергия необходима, чтобы альфа-частица могла преодолеть силы отталкивания и проникнуть в атомное ядро. Естественно было ожидать, что протоны, имеющие меньший заряд и испытывающие, следовательно, меньшее отталкивание, смогут проникнуть в ядро и при меньшей энергии. Более того, теоретически было показано, что внутрь ядра могут проникать частицы самых разнообразных энергий, даже

сравнительно малых. Однако вероятность проникновения внутрь ядра зависит от величины энергии частицы. Чем большей энергией обладает частица, тем больше у неё шансов проникнуть внутрь ядра при столкновении с ним.

Мы не будем здесь останавливаться ни на сложных расчётах этой теории, ни на разборе полученных формул. Из них с несомненностью вытекает, что если бы в распоряжении экспериментаторов были альфа-частицы меньших энергий, но в значительно большем количестве, то и в этом случае можно было бы наблюдать превращение ядер. Естественно-радиоактивные вещества дают сравнительно небольшое количество альфа-частиц в секунду; протонов же можно создать значительно больше. Напомним здесь, что поток протонов, эквивалентный (по переносу заряда) току в один миллиампер, это — поток $6 \cdot 10^{15}$ частиц в секунду. Далее, напомним, что в первых опытах физики имели дело лишь с источниками, испускающими 10^7—10^9 альфа-частиц в секунду. Поэтому становится ясно, что можно было надеяться получить превращение ядер при помощи протонов сравнительно малых энергий. Расчёт показывал, что энергия порядка нескольких сот тысяч электрон-вольт (500 000—600 000 электрон-вольт) была бы вполне достаточной.

Первая установка для искусственного расщепления атомных ядер

Первая успешная попытка превращения ядер быстрыми протонами была сделана Кокрофтом и Уолтоном. Для сообщения протонам столь больших энергий они использовали метод электрического ускорения, многократно применявшийся в лабораториях.

Ускорение зарядов в электрическом поле совершенно аналогично ускорению тел в поле тяжести. Когда камень падает, он приобретает энергию, тем бо́льшую, чем с большей высоты он упал. Также и электрический заряд, «падая» в электрическом поле, приобретает энергию, тем бо́льшую, чем с большей «электрической высоты» (характеризуемой разностью потенциалов) он «упал». Двигаясь в электрическом поле, заряд приобретает кинетическую энергию, равную произведению величины заряда на разность потенциалов. Следовательно, если мы желаем сообщить электронам

или протонам энергию в сотни тысяч электрон-вольт, мы должны прежде всего создать электрическое поле с такой большой разностью потенциалов. Однако этого недостаточно. Нужно в это электрическое поле ввести протоны — положительные ионы атома водорода. И этого мало. Нужно ещё позаботиться, чтобы протоны, введённые в электрическое поле, могли свободно «падать» в нём, чтобы ничто не мешало им приобретать кинетическую энергию.

Так как при движении в воздухе альфа-частицы и протоны сталкиваются всё время с молекулами и теряют при этом энергию, то ясно, что не удастся создать «искусственные снаряды», если ускорять протоны в электрическом поле, созданном в воздухе. Для этого необходимо удалить молекулы с пути протонов; нужно создать требуемое электрическое поле не в воздухе, а в вакууме. По тому времени решение этой задачи было делом нелёгким.

Правда, тогда уже изготовлялись трансформаторы на напряжение в несколько сот тысяч вольт. Существовали отдельные уникальные установки и на один миллион вольт. Однако эти установки не могли быть использованы. Дело в том, что трансформатор даёт переменное напряжение, а надо было иметь постоянное электрическое поле — постоянное напряжение. Были известны способы «выпрямления напряжения» — превращения переменного напряжения в постоянное. Для этого, однако, нужно было иметь конденсатор на требуемое напряжение и выпрямитель, выдерживающий удвоенное напряжение, т. е. напряжение порядка миллиона вольт. Вот это и явилось первым затруднением, ибо в то время существовали конденсаторы и выпрямители (кенотроны) только на напряжение до 200 000 вольт.

Вторым, и пожалуй наибольшим, затруднением являлась необходимость иметь высокое напряжение в вакууме.

Создавать в приборе требуемый весьма высокий вакуум (давление, меньшее одной стомиллионной доли атмосферного) учёные могли. Могли создавать в вакууме и электрическое поле. Примером таких приборов является рентгеновская трубка, представляющая собой стеклянную трубку с двумя впаянными с обоих концов электродами, из которой откачан воздух; между электродами создаётся электрическое поле. Всё это было уже известно; более того, было известно, что чем большее электрическое поле мы хотим создать,

тем длиннее должна быть трубка, тем дальше должны отстоять друг от друга части электродов, выходящие из трубки наружу. Казалось, что нужно было бы взять трубку достаточной длины, и вопрос был бы разрешён. Однако уже было известно, что увеличение длины трубки является эффективным только до некоторого предела, примерно до двухсот тысяч вольт. Никакое увеличение длины трубки не давало возможности перейти через этот предел.

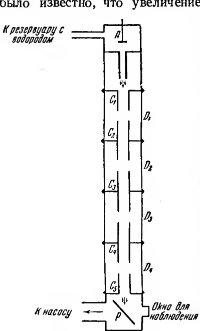


Рис. 20. Принципиальная схема трубки Кокрофта и Уолтона.

Кокрофту и Уолтону необходимо было решить две задачи — создать постоянное электрическое поле напряжением в 600 000—800 000 вольт и приложить это напряжение к вакуумному прибору — трубке.

Они рассуждали так: если нельзя приложить к трубке напряжение, большее, чем 200 киловольт, то и не будем требовать «невозможного». Будем создавать между электродами разность потенциалов только в 200 киловольт, но зато возьмём не пару электродов, а, например, пять. Если между первым и вторым электродами будет создано электрическое поле с разностью потенциалов в 200 киловольт, между вторым и третьим тоже 200 киловольт, между третьим и четвёртым, четвёртым и пятым тоже по 200 киловольт, то при условии, что все эти электрические поля будут иметь одно направление, между первым и пятым электродами разность потенциалов будет равна 800 тысячам вольт. При этом нужно было сделать только одно — дать возможность ускоряемым ионам проходить через электроды из одного

электрического поля в другое. Это оказалось делом несложным: достаточно было сделать для прохода ионов в центре электродов сравнительно небольшие отверстия. Опыт, однако, показал, что трубка работает надёжнее, если электродам придать несколько более сложную форму. На рис. 20 схематически изображена трубка Кокрофта и Уолтона.

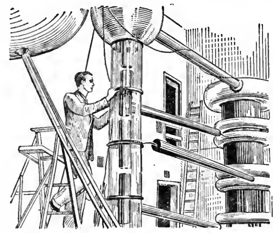


Рис. 21. Трубка Крейна, построенная по принципу Кокрофта и Уолтона.

Буквами C_1, C_2, C_3, C_4 и C_5 обозначены электроды. Между каждой парой соседних электродов устанавливается разность потенциалов в 200 000 электрон-вольт. D_1, D_2, D_3 и D_4 — стеклянные цилиндры, соединяющие каждую пару электродов. Соединение цилиндров с электродами осуществлялось при помощи особой замазки, обеспечивающей вакуумное уплотнение, т. е. не пропускающей через место соединения воздух внутрь трубки. В верхнем электроде C_1 имелось отверстие, через которое из разрядного прибора A поступали внутрь трубки протоны. Пройдя сквозь все электроды и получив при этом энергию, равную (в электрон-вольтах) разности потенциалов между первым и последним электродами, протоны ударялись о мишень P, на которую помещалось исследуемое вещество. На рис. 21 изображена фотография трубки, построенной Крейном по указанному принципу.

Мы рассказали, как была решена вторая задача. Рассмотрим теперь, как была решена первая задача — получение постоянного напряжения. При решении этой задачи Кокрофт и Уолтон воспользовались разработанными ранее схемами выпрямления и умножения напряжения. Чтобы понять принцип, заложенный в их установке, обратимся к схеме, изображённой на рис. 22.

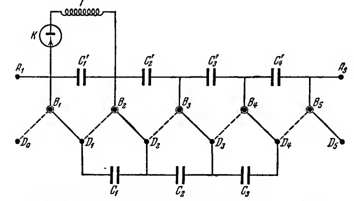


Рис. 22. Ускорительная часть установки Кокрофта и Уолтона.

Допустим, что в нашем распоряжении имеется трансформатор T, который даёт напряжение в 200 киловольт. Зарядим при помощи кенотрона K конденсатор C'_1 до этого напряжения. Соединим последовательно с этим конденсатором вспомогательные конденсаторы C'_2, C'_3, C'_4 и, кроме того, создадим группу последовательно соединённых конденсаторов C_1, C_2, C_3, каждый из которых должен быть рассчитан на напряжение в 200 киловольт. Группа конденсаторов C'_1, C'_2, C'_3, C'_4 может соединяться с группой конденсаторов C_1, C_2, C_3 при помощи переключателя. Все конденсаторы имеют одинаковую ёмкость. Переключатель может занимать два положения. В первом положении клемма B_1 соединяется с D_1, B_2—с D_2, B_3—с D_3, B_4—с D_4, B_5—с D_5; во втором положении B_1 соединяется с D_0, B_2—с D_1, B_3—с D_2, B_4—с D_3, B_5—с D_4. Эти положения переключателя показаны на рис. 22 разными линиями: первое положение — сплошной линией, второе положение — пунктирной.

Что же произойдёт, когда мы приведём переключатель в действие? Сначала (первое положение) конденсатор C'_1 окажется приключённым параллельно к конденсатору C_1, и оба конденсатора зарядятся до напряжения в 200 киловольт. При перемещении переключателя во второе положение конденсатор C_1' окажется отключённым, зато конденсатор C_1 окажется соединённым параллельно с конденсатором C'_2. Вследствие этого конденсатор C'_2 зарядится до половины разности потенциалов, бывшей на конденсаторе C_1, в то время как конденсатор C_1 разрядится наполовину. На нём, так же как и на конденсаторе C'_2, будет теперь разность потенциалов в 100 киловольт. Вернём переключатель в первоначальное положение. Конденсатор C_1 окажется снова соединённым с конденсатором C'_1 и при этом опять зарядится до 200 киловольт. Одновременно с этим зарядится также и конденсатор C_2, который при этом положении переключателя оказывается соединённым с конденсатором C'_2. Конденсатор C'_2 разрядится до 50 киловольт, а конденсатор C_2 зарядится до 50 киловольт. Вернём переключатель во второе положение. Конденсатор C_1 снова соединится с конденсатором C'_2. Напряжение на них уравняется и станет равным среднему из того, что имелось на обоих конденсаторах. На C_1 было 200 киловольт, на C'_2 — 50 киловольт. Значит, на каждом конденсаторе окажется по 125 киловольт. Но, кроме этого, частично зарядится и конденсатор C'_3, ибо он окажется соединённым с конденсатором C_2. Конденсатор C'_3 зарядится до 25 киловольт. Продолжая производить переключения, мы увидим, что постепенно все конденсаторы C'_2, C'_3, C'_4 окажутся заряженными до 200 киловольт, и на концах A_1 A_3 разность потенциалов достигнет 800 киловольт. Таким образом, можно получить нужное напряжение. Более того, высокое напряжение оказывается разделённым на части по 200 киловольт каждая, а это чрезвычайно важно для работы трубки, ибо к каждому электроду оказывается возможным приложить допустимое для его работы относительно небольшое напряжение.

В действительной установке механического переключающего устройства не было. Эту задачу удалось осуществить с помощью системы кенотронов, действующих аналогично механическому переключателю.

Расщепление лития

Перейдём теперь к описаиию самих исследоваиий. Первые опыты были сделаиы с литием. Кокрофт и Уолтои правильио думали, что ядрам водорода — протоиам проникнуть в ядра лития будет легче всего, ибо вследствие малости заряда ядра лития (заряд ядра лития раваи 3 едииицам) силы отталкиваиия между этим ядром и протоном будут меньше, чем между ядром лития и альфа-частицей.

Наблюдеиие за превращением ядер лития велось при помощи метода сцинтилляций, для чего иа некотором расстоянии от мишеии устаиавливался экраи из сериистого циика, защищённый от прямого попадаиия протоиов.

Уже в первых наблюдеииях было обнаружено, что при бомбардировке лития протоиами таких сравнительно иебольших по ядерным масштабам энергий, как 500—800 тысяч электрои-вольт, иа экраие из сериистого циика появляются яркие сцинтилляции. Очевидио было, что из лития вылетали какие-то частицы, вызывающие эти сциитилляции. Но что это за частицы? Может быть, это — протоны, падавшие на литиевую мишеиь и рассеяииые ею?

Для того чтобы решить этот вопрос, Кокрофт и Уолтон помещали между экраиом и литиевой мишенью тоикие слюдяиые пластинки. Меияя толщииу этих пластинок и наблюдая число сциитилляций, можио было заметить, при какой толщиие пластинок оии полиостью прекратятся. Такое иаблюдеиие давало возможиость определить пробег частиц, а следовательно, их эиергию. Пробег частиц, производящих сцинтилляции, оказался очень большим: он соответствовал 8,4 *см* воздуха. Столь большой пробег иадёжио свидетельствовал о том, что иаблюдаемые по сциитилляциям частицы не есть протоны, рассеяииые самой мишеиью, ибо пробег таких протоиов ие превышает 3 *см*. Следовательно, иаблюдаемые частицы возиикают из лития в результате бомбардировки его протоиами. Коитрольные опыты, при которых литиевая мишеиь замеиялась мишенью из меди, подтвердили это заключеиие, ибо в этом случае частиц с пробегом 8,4 *см* ие иаблюдалось.

Итак, искусствеиное превращение элемеитов стало реальным фактом. Что же это было за превращеиие и что за частицы наблюдали при этом?

Ответ на этот вопрос мог быть только единственным. Раз наблюдаемые частицы возбуждают сцинтилляции и в то же время не являются протонами, то они являются альфа-частицами, и следовательно, ядерное превращение, которое произошло под действием протонов, должно быть записано так:

$${}^{7}_{3}Li + {}^{1}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{4}_{2}He,$$

т. е. в результате превращения ядро лития, поглотившее протон, распалось на две альфа-частицы.

Это заключение можно было подвергнуть экспериментальной проверке. В самом деле, из законов механики следует, что если в результате проникновения протона в ядро лития оно распадается на две альфа-частицы, то эти частицы будут разлетаться с равной энергией в противоположные стороны.

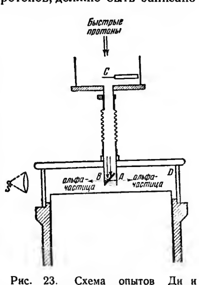


Рис. 23. Схема опытов Ди и Уолтона.

A — окошко, *B* — мишень, обстреливаемая протонами, *C* — заслонка, *D* — камера Вильсона, *S* — источник света

Образуются ли, в действительности, при превращении лития две альфа-частицы, разлетающиеся в разные стороны? Выяснение этого вопроса явилось целью работ Ди и Уолтона. Они решили присоединить к трубке, в которой происходило превращение лития, камеру Вильсона и наблюдать в ней пробеги частиц, образующихся при превращении лития. Конечно, присоединение камеры Вильсона к трубке было делом не простым. Ведь в камере Вильсона должны быть пары воды, а в трубке, в которой производится ускорение протонов, хороший вакуум. Без паров воды не работает камера Вильсона, с парами воды не работает трубка. Однако выход из положения был найден. Конец трубки (рис. 23), в которой находилась мишень *B*, был сделан в виде сетки, закрываемой листочком слюды, столь тонким, что через него

могли проходить альфа-частицы большой энергии. Пропуская альфа-частицы, слюдяной листочек служил в то же время надёжной перегородкой для воздуха и паров воды. Таким образом, можно было в трубке иметь хороший вакуум, в камере Вильсона — необходимую упругость паров воды и в то же время дать возможность альфа-частицам проходить из трубки в камеру Вильсона. Одна из полученных фотографий изображена на рис. XXIII в конце книги. На ней отчётливо видны парные следы альфа-частиц, летящих в противоположных направлениях.

По величине пробега альфа-частицы можно определить её энергию. Она оказалась равной 8,8 миллиона электрон-вольт. Так как таких частиц две, то полная кинетическая энергия их будет равна 17,6 миллиона электрон-вольт. Это — громадная энергия. И это обстоятельство позволяет произвести количественную проверку, имеющую исключительно важное значение.

Экспериментальная проверка формулы Эйнштейна

Речь идёт о соотношении между массой и энергией, установленном Эйнштейном в теории относительности. Как мы указывали выше, по теории относительности соотношение между массой m и энергией W выражается следующим образом:

$$W=mc^2, \tag{8}$$

где W — энергия тела, m — его масса, c — скорость света.

Соотношение (8) имеет громадное принципиальное значение, поскольку оно устанавливает связь между характеристиками вещества (массой и энергией), ранее казавшимися независимыми. Это соотношение имеет исключительное значение для ядерной физики, поскольку почти вся масса тел сосредоточена в атомных ядрах. Из него, в частности, следует, что основная доля энергии атомов заключена в атомных ядрах.

Соотношением (8) мы уже пользовались ранее. С помощью него мы объясняли наличие дефекта массы у различных атомных ядер, устанавливали баланс энергии при ядерных превращениях, выясняли возможный характер этих превращений. Однако до тридцатых годов нашего столетия это

соотношение не было проверено путём непосредственных экспериментальных измерений, ибо измерить изменение массы можно было только в случае больших изменений энергии. Опыты по превращению ядер лития впервые дали возможность произвести экспериментальную проверку правильности соотношения (8).

Согласно этим опытам при попадании протона с энергией 800 000 электрон-вольт в ядро лития возникают две альфа-частицы с суммарной кинетической энергией 17,6 миллиона электрон-вольт. Поскольку никаких других изменений энергий не произошло, избыток кинетической энергии у альфа-частиц, равный 16,8 миллиона электрон-вольт, мог образоваться только в связи с уменьшением массы ядер лития и водорода. В рассматриваемом превращении участвуют атомы лития 7, водорода и гелия. Массы всех этих атомов хорошо известны (см. таблицу V на стр. 100). Масса атома водорода равна 1,00813 единицы атомного веса, масса атома лития равна 7,01816, а масса атома гелия — 4,00386.

Сравним массы частиц до и после ядерной реакции. Сумма масс атомов лития и водорода равна 8,02629, а сумма масс двух атомов гелия равна 8,00772 единицы атомного веса. Мы видим, что сумма масс двух атомов гелия на 0,01857 единицы атомного веса меньше, чем сумма масс атомов лития и водорода. Но мы уже знаем, что $1,07 \cdot 10^{-3}$ единицы массы соответствуют энергии в один миллион электрон-вольт, а 0,01857 единиц массы будут соответствовать 17,35 миллиона электрон-вольт.

Итак, при образовании двух альфа-частиц из ядра лития и протона происходит уменьшение массы, а вместе с тем и энергии на величину, соответствующую 17,3 миллиона электрон-вольт, и в то же время выделяется энергия (в форме кинетической энергии альфа-частиц), равная 16,8 миллиона электрон-вольт. Оба эти числа, из которых одно подсчитано при помощи соотношения (8), а другое измерено на опыте, с точностью до ошибок измерения совпадают друг с другом.

Таким образом, в результате изучения расщепления ядер лития протонами удалось проверить и подтвердить экспериментально одно из самых важных в ядерной физике соотношений:

$$W = mc^2.$$

Идеалисты пытались использовать это соотношение для доказательства того, что «масса превращается в энергию», а следовательно, ненавистная им материя «дематериализуется, исчезает». На самом же деле ничего подобного не происходит. Рассуждения идеалистов о «превращении массы в энергию» не находят никакого подтверждения в соотношении (8) и являются следствием сознательного искажения подлинного научного содержания этого соотношения.

Соотношение (8) показывает, что определённое количество любого вида энергии всегда связано с определённым количеством массы. Поэтому всякое уменьшение или увеличение энергии сопровождается уменьшением или увеличением массы на величину, определяемую этим соотношением. В каждом случае, в том числе и в рассмотренной здесь ядерной реакции $^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{4}_{2}He + ^{4}_{2}He$, выполняются и закон сохранения массы и закон сохранения энергии.

Энергия является характеристикой движения материи; масса также является характеристикой материи. Таким образом, соотношение (8) является блестящим подтверждением диалектического материализма, согласно которому не существует материи без движения, так же как и движения без материи.

Генератор Ван-де-Граафа

Успех опытов Кокрофта и Уолтона, добившихся превращения ядер при помощи искусственно ускоренных частиц, и понимание того, что величина электрического поля ограничивает открывшиеся при этом возможности, заставили многих учёных заняться поисками путей и способов увеличения кинетической энергии частиц.

Одна из удачных попыток получить высокое напряжение принадлежит Ван-де-Граафу. Ван-де-Грааф сумел модернизировать хорошо известную электростатическую машину и применить её для ускорения заряженных частиц.

Представим себе изолированный шар и поставим перед собой задачу зарядить этот шар как можно сильнее, т. е. до возможно большего потенциала.

В школьных опытах по физике часто демонстрируют зарядку изолированного шара. Для этого к шару прикасаются каким-нибудь другим заряженным предметом (например, стеклянной палочкой, натёртой о кошачий мех). Таким про-

стым приёмом удаётся зарядить шар не очень сильно. Много причин ограничивает достижение высокого потенциала и прежде всего то, что на самой палочке находится небольшой заряд. Лучших результатов можно добиться, если передачу заряда с заряженной палочки на шар проделать многократно (так примерно и поступают в электростатических машинах). Каждая порция электрического заряда, приносимая палочкой, увеличивала бы заряд шара. Однако скоро мы достигли бы некоторого предела.

Одна из наиболее важных причин ограничения степени электризации шара заключается в том, что в действительности шар не вполне изолирован и в промежутке между двумя передачами заряда шару часть зарядов с него уйдёт. Утечка зарядов будет происходить тем сильнее, чем больше по отношению к окружающим предметам будет заряжен шар. Ясно, что для того чтобы добиться лучшей зарядки шара, надо возможно чаще и в возможно большем количестве подводить к нему новые порции заряда. Лучше всего подводить к шару электрические заряды непрерывно.

С другой стороны, надо попытаться уменьшить утечку электрических зарядов с шара. Утечка зарядов обусловлена двумя причинами: во-первых, заряд стекает по тому изолятору, на котором укреплён шар; во-вторых, заряд стекает с шара через воздух. С возрастанием потенциала шара растут утечки и по изолятору и через воздух.

Уже давно было установлено, что величина утечки заряда через воздух зависит от размеров шара и от состояния его поверхности. Чем больше радиус шара, тем меньше будут эти утечки. Всякие шероховатости на поверхности шара, особенно острые неровности, в значительной мере способствуют утечке заряда.

Зная это, можно было сформулировать те требования, которые нужно было выполнить для того, чтобы зарядить шар до высокого потенциала. Прежде всего необходимо брать шар или, как его называют, «кондуктор», большого размера, радиусом в несколько метров. Надо было сделать его по возможности гладким, без шероховатостей и острий на его поверхности и постараться подводить к нему непрерывно возможно больший заряд. Конечно, шар должен быть удалён на возможно большее расстояние от окружающих предметов. Лучше всего, если он находится в пустом поме-

щении с гладкими стенами. Шар должен быть соответственным образом изолирован. Выполнить эти требования оказалось нелегко и Ван-де-Граафу пришлось преодолеть много различных затруднений.

На рис. 24 дана схема электростатического генератора Ван-де-Граафа при помощи трансформатора T, создающего напряжение в несколько десятков тысяч вольт, к системе острий O (на нашей схеме показано только одно остриё) подаётся потенциал такой величины, чтобы с острий началось интенсивное стекание зарядов. Для того чтобы стекали заряды только одного знака, нужно на острие поддерживать постоянный потенциал. Поэтому в цепь трансформатора вводят выпрямитель K (кенотрон), а иногда ещё для выравнивания напряжения и конденсатор C.

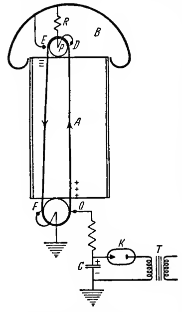


Рис. 24. Схема электростатического генератора Ван-де-Граафа.

Мимо острий, с которых стекает заряд, всё время движется лента A из изоляционного материала (лучше всего — прорезиненная ткань). На эту ленту стекает положительный заряд, который вместе с нею переносится к шару B. Внутри шара B, являющегося кондуктором, находится устройство D (тоже состоящее из системы острий), которое снимает с ленты имеющийся на ней заряд.

Снятие заряда происходит следующим образом. Когда заряд, находящийся на ленте, подходит к острию D, он индуцирует на острие заряд противоположного знака, в данном случае отрицательный. Положительный же заряд, возникающий на острие, переходит на соединённый с остриём валик p. Отрицательный заряд стекает с острия D и уничтожает положительный заряд, имеющийся на ленте. Положи-

тельный же заряд, оказавшийся на валике p, переходит через сопротивление R на наружную поверхность кондуктора B. Таким образом, поток зарядов, переносимый лентой, переходит на кондуктор, заряжая его и создавая разность потенциалов между кондуктором и окружающими предметами (землёй). Зарядку кондуктора можно усилить, если заставить ленту не только приносить положительный заряд к кондуктору, но и уносить от него отрицательный заряд. Для этого внутри шара против валика p на отходящей стороне ленты помещают систему острий E, соединённых с внутренней поверхностью кондуктора B. Благодаря тому что ток положительных зарядов, идущий с валика p на кондуктор B, проходит через сопротивление R, на этом сопротивлении возникает падение потенциала тем большее, чем больше величина сопротивления R и заряд, переносимый лентой. Итак, валик p по отношению к кондуктору B, а следовательно, и по отношению к острию E, будет заряжен положительно. Всегда можно подобрать величину сопротивления R такой, чтобы разность потенциалов между валиком p и кондуктором B могла вызвать истечение зарядов с острия E. Так как потенциал валика p больше потенциала кондуктора B, с острия E будут стекать отрицательные заряды, а положительные заряды соответствующей величины перейдут на внешнюю поверхность шара.

Таким образом, лента приносит внутрь шара положительный заряд, а уносит отрицательный, вследствие чего шар заряжается. Зарядка шара будет происходить до тех пор, пока утечка зарядов с него не сделается равной поступающему на шар заряду. Куда же уходят заряды с шара? Часть зарядов уходит с шара через трубку, подключаемую к кондуктору B,— это «полезный» ток. Другая часть уходит через сопротивления (в частности, через изоляцию шара) и через так называемую корону. Ток короны в основном и определяет потенциал, до которого заряжается шар. Чем больше будет радиус кривизны кондуктора, тем до большего потенциала можно будет его зарядить.

Трубка к генератору Ван-де-Граафа делается обычно по типу трубки Кокрофта и Уолтона. Так как к такой трубке нужно подводить секционированное напряжение, то обычно к кондуктору B параллельно трубке присоединяют потенциометр — сопротивление, подразделённое на столько

равных частей, сколько секций сделано в трубке. При постоянном токе на равных сопротивлениях происходит равное падение напряжения, поэтому всё имеющееся на потенциометре напряжение оказывается подразделённым на несколько равных частей, каждая из которых и присоединяется к отдельной секции трубки.

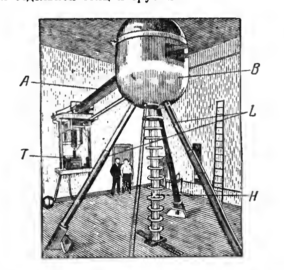


Рис. 25. Электростатический генератор с диаметром кондуктора 2 *м*.

A — лента, несущая заряды; *B* — кондуктор; *T* — трансформатор для зарядки ленты; *H* — трубка; *L* — изоляторы.

Необходимость придавать самому кондуктору большие размеры и, кроме того, отдалять его от окружающих предметов делает электростатические генераторы громоздкими и дорогостоящими сооружениями. Обычно для них приходится строить специальные здания. Для иллюстрации мы приводим несколько фотографий электростатических генераторов. На рис. 25 показан один из первых электростатических генераторов — «маленький» электростатический генератор с диаметром кондуктора, равным 2 *м*. При помощи такого генератора можно ускорить частицы до 1,5 миллиона электрон-вольт.

На рис. 26 показан другой электростатический генератор, состоящий из двух кондукторов, один из которых заряжается положительно, другой — отрицательно. Диаметр каждого из шаров около 4,5 *м*. Разность потенциалов между шарами может быть доведена до 5 миллионов вольт.

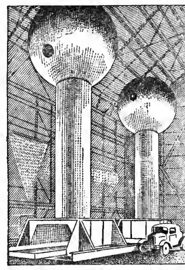


Рис. 26. Электростатический генератор, рассчитанный на 5 миллионов вольт.

Большим недостатком электростатических генераторов является громоздкость. Однако с этим недостатком можно бороться. Можно уменьшить утечку зарядов с кондуктора, не увеличивая его размеров, а улучшая изолирующие свойства среды, окружающей кондуктор.

Давно известно, что сжатые газы обладают гораздо большей электрической прочностью, чем обыкновенный воздух. Поэтому были предприняты успешные попытки заключать электростатические генераторы в специальные кожухи, в которых находился газ под давлением в несколько атмосфер (в настоящее время давление внутри генераторов доводят до 16 атмосфер), и наполнять их газом, обладающим большой электрической прочностью.

Естественно, конечно, что и трубку, в которой происходит ускорение заряженных частиц, также приходится помещать в этот кожух.

Один из таких генераторов показан на фотографии XXIV в конце книги. Эта фотография двойная. Сначала на фотопластинку сфотографировали внутреннее устройство генератора, а затем (на ту же пластинку) — весь генератор в целом. Ускорительная трубка в этом генераторе, так же как и трубка Кокрофта и Уолтона, делается из отдельных частей, разделённых металлическими электродами, к каждой

из которых подключается часть полного напряжения, генерируемого в установке. Трубка вместе с изоляторами, на которых укреплён кондуктор, смонтирована внутри кожуха, в котором давление газа доводится до 16 атмосфер.

Чтобы дать представление о размерах такого электростатического генератора, приведём некоторые данные. Генерируемое напряжение — 2 миллиона вольт. Длина трубки — 142 *см*. Диаметр металлического кожуха — 135 *см*. Длина кожуха — 305 *см*. Такой генератор свободно размещается в обычной комнате. В настоящее время генераторы такого типа делаются на напряжение до 5 миллионов вольт.

Электростатические генераторы получили большое распространение. Они позволяют сообщать частицам энергии порядка 5 миллионов электрон-вольт при сравнительно сильных токах через трубку. Их замечательной особенностью является лёгкость и плавность регулировки напряжения (что достигается, например, изменением тока зарядки), а также стабильность получаемого напряжения.

Ускорение переменным электрическим полем

Создание электростатических генераторов позволило ускорять заряженные частицы до энергий 5 миллионов электрон-вольт. Однако и такие энергии оказались недостаточными. Необходимо было осуществить дальнейший рост энергии разгоняемых частиц. Решить эту задачу при помощи высоковольтных установок невозможно. Необходимо было найти иные пути ускорения ионов. Как это ни покажется странным на первый взгляд, пришлось для этой цели воспользоваться переменным напряжением. Идея этого метода ускорения принадлежит Лауритсену и Слоану.

Каким же образом можно ускорять ионы переменным напряжением? Ведь в случае переменного поля периодически происходит изменение направления электрической силы, действующей на частицу. В течение одной части времени частица будет ускоряться (когда направление сил совпадает с направлением движения), а в течение другой такой же части времени (когда направление электрического поля изменится и сила будет направлена против движения частицы) она будет тормозиться. Если частица то ускоряется, то замедляется, и замедляется при этом столько же времени,

сколько и ускоряется, то вряд ли можно ожидать, чтобы в результате такого движения она приобрела значительную энергию. Именно поэтому для ускорения заряженных частиц физики стремились создать постоянное электрическое поле.

Однако был найден приём, позволяющий обойти затруднения, связанные с ускорением заряженных частиц в пере-

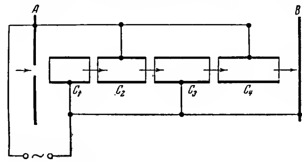


Рис. 27. Принципиальная схема линейного ускорителя.

менном электрическом поле. Допустим, что между электродами A и B (рис. 27) создано переменное электрическое поле. Поместим между этими электродами ряд трубок, которые обозначены буквами C_1, C_2, C_3, C_4. Все эти трубки играют роль электродов. Однако эти электроды — особенные, потому что электрическое поле внутри трубок отсутствует. Когда к трубкам приложена разность потенциалов, то *электрическое поле будет заключено в пространстве между трубками, внутри же самих трубок электрического поля нет.* Благодаря трубчатой форме электродов ускоряемые частицы могут свободно проходить сквозь них.

Заряженная частица, движущаяся от A к B, будет испытывать действие поля только в пространстве между трубками, а внутри трубок будет двигаться по инерции. Меняя длину трубок, можно изменять промежуток времени, в течение которого частица находится вне действия поля. Соединим электроды A и B и трубки C_1, C_2, C_3, C_4 между собой так, что электрод A и трубки C_2, C_4 будут иметь одинаковый потенциал, а электрод B и трубки C_1, C_3 — также одинаковый потенциал, но другой величины.

Допустим для определённости, что потенциал электрода A будет больше, чем электрода B. Тогда положительно заряженная частица при движении от электрода A к трубке C_1 будет ускоряться электрическим полем, но при движении от трубки C_1 к трубке C_2 (т. е. при движении от меньшего потенциала к большему) будет тормозиться. То же самое было бы при её дальнейшем движении (от C_2 к C_3 она ускорялась бы, от C_3 к C_4 снова тормозилась), если бы к системе трубок была бы приложена постоянная (во времени) разность потенциалов. По-иному будет проходить ускорение частиц, если к электродам A и B (а следовательно, и к трубкам C_1, C_2, C_3 и C_4) приложить переменную разность потенциалов, меняющуюся со временем по закону $V = V_0 \sin \omega t$.

Допустим, что в тот момент, когда электрическое поле направлено от A к B (т. е. потенциал электрода A выше потенциала электрода B) и имеет максимальную величину, из электрода A вышла положительно заряженная частица. Под действием электрического поля она будет двигаться от A к B и по мере движения ускоряться. Когда частица достигнет трубки C_1, она приобретёт энергию, равную $e \cdot V_0$, где e — заряд частицы, а V_0 — максимальная разность потенциалов между A и C_1. Когда частица пройдёт внутрь трубки, электрическое поле перестанет действовать на неё, и она будет двигаться с постоянной скоростью. В то время, пока она движется внутри трубки C_1, электрическое поле будет меняться, разность потенциалов между A и C_1 будет уменьшаться, сделается равной нулю, а потом изменит знак, т. е. потенциал у электрода C_1 сделается больше, чем потенциал у электрода A. Выберем длину трубки C_1 таким образом, чтобы к тому моменту, когда разность потенциалов между A и C_1 достигнет наибольшего отрицательного значения, движущаяся частица дошла до конца трубки C_1. За трубкой C_1 расположена другая трубка C_2, соединённая с электродом A так, что потенциалы A и C_2 будут одинаковы в любой момент времени.

Так как в описываемый момент, т. е. когда движущаяся частица вошла в пространство между трубками, потенциал электрода B будет больше, чем потенциал электрода A, то частица на пути от C_1 к C_2 снова ускорится и приобретёт дополнительную энергию, равную eV_0. Таким образом, ког-

да частица пройдёт внутрь трубки C_2 (где электрического поля нет), она будет иметь дополнительную энергию $2eV_0$.

В дальнейшем, по мере движения частицы внутри трубки C_2 электрическое поле между трубками и электродами будет продолжать меняться. Разность потенциалов снова переменит знак; потенциал электродов C_2 и C_4 вновь сделается больше, чем у электрода B и трубки C_3.

Выберем длину трубки C_2 так, чтобы в момент, когда разность потенциалов между A и B достигнет максимального значения, частица дошла бы до конца трубки C_2. Так как за электродом C_2 расположен новый электрод C_3, имеющий одинаковый потенциал с электродом B, то на пути между C_2 и C_3 частица вновь ускорится, ибо в этот момент потенциал электрода C_2 будет больше потенциала электрода C_3. Пройдя трубку C_2, частица будет иметь энергию, равную $2eV_0$. Между C_2 и C_3 она снова ускорится и т. д. Когда частица подойдёт к электроду B, её энергия будет равна $5eV_0$, ибо на пути AB она ускорялась пять раз.

Замечательным оказывается то, что частица накопила энергию $5eV_0$, *не проходя нигде разности потенциалов, большей* V_0.

Такое накопление энергии оказалось возможным потому, что всякий раз, когда электрическое поле менялось с ускоряющего на тормозящее, частица оказывалась в пространстве, лишённом электрического поля. В этом и заключается суть идеи Лауритсена и Слоана. Если создать условия, при которых частица будет находиться вне электрического поля в то время, когда его направление меняется, то можно сравнительно малым по величине переменным напряжением сообщить ускоряемой частице большую энергию. Оказывается, что ускорять частицы переменным электрическим полем не только возможно, но даже удобнее, чем постоянным. Большие электрические поля оказываются ненужными. Надо только умело распорядиться движением частицы, защищая её от действия электрического поля в те моменты времени, когда поле направлено неблагоприятно.

Легко сообразить, как должна изменяться длина трубок C_1, C_2, C_3, ... , внутри которых движется частица, в течение того времени, когда электрическое поле меняется от одного максимального значения до другого, противоположно направленного. Так как мы требуем, чтобы время движения

частицы внутри каждой трубки было одним и тем же, а именно равным половине периода изменения напряжения, то длина этих трубок l должна возрастать так же, как возрастает скорость частицы. Скорость частицы меняется как корень квадратный из её энергии, а энергия частицы внутри каждой последующей трубки увеличивается на одну и ту же величину, следовательно,

$$l_1:l_2:l_3:l_4:l_5:\ldots=1:\sqrt{2}:\sqrt{3}:\sqrt{4}:\sqrt{5}:\ldots,$$

где l_1 — длина первой трубки, l_2 — длина второй и т. д.

Если число таких трубчатых электродов будет n, то дополнительная энергия, приобретённая частицей при её движении от электрода A до электрода B, будет, очевидно, равна

$$(n+1)eV_0.$$

Таким образом, оказывается возможным с помощью малой разности потенциалов V_0 сообщить частицам большую энергию, если взять систему из большого числа электродов соответственно подобранной длины.

Этот путь был использован Лауренсом. Ему удалось с помощью системы, состоящей из 31 электрода, между которыми была приложена разность потенциалов, равная 42 000 вольт, ускорить ионы ртути до энергии в 1 260 000 электрон-вольт.

Ионы ртути были выбраны в качестве ускоряемых частиц с целью уменьшения частоты переменного тока. Напомним, что для ускорения частиц необходимо иметь переменные электрические поля большой частоты. Скорость ионов ртути при энергии в 1 миллион электрон-вольт равна 10^8 *см/сек*. Чтобы пробежать путь в 10 *см*, потребуется время 10^{-7} сек. Значит, для ускорения частиц обычное 50-периодное напряжение не годится. Частота изменения напряжения должна быть значительно больше. Не менее 20 миллионов раз в секунду должно изменяться напряжение, чтобы оказалось возможным ускорение ионов ртути. Для ускорения протонов требуется поле, меняющееся до 300 миллионов раз в секунду. Необходимость создания полей высокой частоты и одновременно большие размеры установки помешали распространению способа, предложенного Лауритсеном и Слоаном. Однако в настоящее время в связи с

развитием вакуумной техники и радиотехники стало возможным преодолеть эти затруднения и линейные ускорители (так называют теперь установки, работающие по методу Лауритсена и Слоана) получили дальнейшее развитие. Уже построен линейный ускоритель протонов на 150 миллионов электрон-вольт. Проектируются и строятся линейные ускорители на значительно большую энергию.

Циклотрон

Большое число электродов являлось существенным недостатком описанного метода. Лауренс предложил ограничиться всего двумя электродами, но поместить их в магнитное поле.

В постоянном магнитном поле заряженная частица движется по окружности. Радиус кривизны этой окружности R зависит от массы движущейся частицы, её скорости и величины магнитного поля. Эта зависимость даётся формулой

$$R = \frac{mu}{He}. \qquad (9)$$

Здесь R — радиус кривизны траектории частицы, m — её масса, H — напряжённость магнитного поля, e — заряд движущейся частицы. Из этой формулы видно, что радиус окружности, описываемой движущейся частицей, прямо пропорционален её скорости. Если скорость частицы изменится, то изменится и радиус её траектории, причём, что весьма существенно, радиус изменится во столько же раз, во сколько раз изменилась скорость. Мы знаем, что длина окружности пропорциональна её радиусу. Следовательно, время, в течение которого заряженная частица, двигаясь в магнитном поле, опишет окружность, будет одним и тем же независимо от скорости частицы. Это время T равно

$$T = \frac{2\pi R}{u} = 2\pi \frac{m}{eH}. \qquad (10)$$

Соотношение (10) показывает, что время, в течение которого частица, движущаяся в магнитном поле, описывает окружность, зависит только от величины магнитного поля и отношения $\frac{e}{m}$. Для частиц данной массы m и заряда e период

обращения T будет постоянным, если будет постоянна величина H.

Лауренс и воспользовался тем, что время полного оборота не зависит от энергии частицы. Он придал электродам, между которыми создавалось переменное электрическое поле, форму полой цилиндрической коробки, разрезанной на две половинки (рис. 28). Внутри такой коробки (так же как и внутри цилиндрической трубки линейного ускорителя)

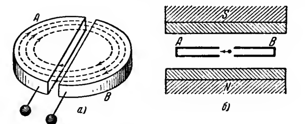


Рис. 28. Циклотрон.
а) ускорительная камера; б) её положение между полюсами магнита.

электрическое поле отсутствует. Лишь в пространстве между этими электродами будет поле, при помощи которого можно сообщать энергию заряженным частицам.

Если два таких электрода поместить в магнитное поле и подобрать его напряжённость так, чтобы время T сделалось равным периоду изменения электрического поля, то положительно заряженная частица, вышедшая из электрода B в момент, когда разность потенциалов между B и A положительна, будет ускоряться всякий раз, когда она переходит от электрода к электроду.

Для иллюстрации на рис. 29 изображена траектория движущейся частицы. Пусть частица выходит из точки P в момент, когда потенциал электрода A больше, чем потенциал электрода B. Через время $T/2$ частица, описав полуокружность, выйдет из электрода B и станет двигаться по направлению к электроду A, но за время $T/2$ разность потенциалов изменит знак. Потенциал B станет больше, чем A, и частица вновь ускорится. Внутри электрода A частица будет двигаться с большей скоростью и за время $T/2$ вновь опишет половину окружности (большего радиуса), после чего,

двигаясь от A к B, снова ускорится. Следовательно, всякий раз, когда частица будет переходить от электрода к электроду, она будет ускоряться. Радиус движения частицы по мере ускорения будет возрастать. Следовательно, для сообщения частицам большой энергии необходимо придать электродам большие размеры. Область постоянного магнитного

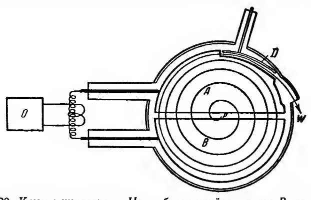


Рис. 29. Камера циклотрона. Ион, образующийся в точке P, движется по спирали под влиянием магнитного поля, перпендикулярного к плоскости чертежа, испытывая ряд последовательных ускорений в промежутке между двумя половинами A и B ускорительной камеры; затем он отклоняется при помощи отклоняющей пластины D и выходит наружу через окошко W.

поля также должна быть тем большей, чем больше будет энергия частицы. Взяв достаточно большую камеру и достаточно большой магнит, можно получить частицы значительных энергий.

Работающий на этом принципе прибор получил название циклотрона. В циклотроне, как и в линейном ускорителе, частицы ускоряются при помощи переменного электрического поля. Магнитное поле необходимо лишь для управления движением заряженной частицы, чтобы дать ей возможность проходить промежуток между электродами тогда, когда электрическое поле в нём направлено благоприятным образом.

Идея циклотрона оказалась весьма плодотворной, и скоро Лоуренс получил пучки дейтронов *) с энергией в 3—5,

*) Дейтроном называется ядро тяжёлого изотопа водорода.

а затем и в 10 миллионов электрон-вольт. Помимо пучка дейтронов такой энергии, ему удалось получить и пучки протонов и ядер гелия, обладающих энергией в несколько миллнонов электрон-вольт.

Как мы уже указывалн, величнна энергии, приобретаемой частицей в циклотроне, зависит от размеров циклотро-

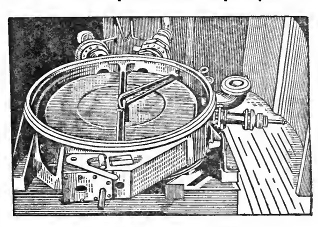


Рис. 30. Камера циклотрона.

на. Чем больше энергия частицы, тем больше радиус её траектории в магнитном поле. При данном радиусе траектории энергня протонов, дейтронов и ионов гелия будет различна. Чем больше масса частицы, тем меньше будет её энергня. Ещё более существенно сказывается заряд ускоряемого иона. Энергия, приобретаемая частицей в циклотроне данного размера, пропорциональна квадрату заряда этой частицы.

На рис. 30 изображена камера циклотрона. На рис. 31 показан общий вид циклотрона с диаметром полюсных наконечников, равным 1,5 *м*. Рис. 32 изображает циклотрон в «действии». Виден след пучка дейтронов с энергией выше 15 миллнонов электрон-вольт. След виден потому, что воздух, ионизированный на пути пучка дейтронов, светится. Путь, проходнмый дейтронами такой энергии в воздухе, равен приблизнтельно 2 *м*.

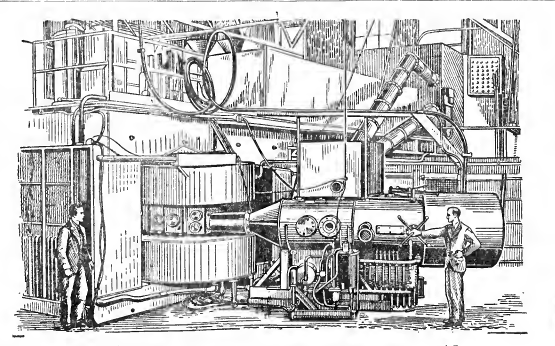


Рис. 31. Общий вид циклотрона с диаметром полюсных наконечников 1,5 *м*.

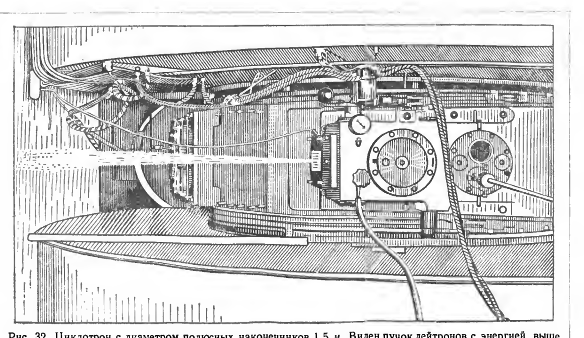


Рис. 32. Циклотрон с диаметром полюсных наконечников 1,5 *м*. Виден пучок дейтронов с энергией выше 15 миллионов электрон-вольт. Он светится вследствие возбуждения молекул воздуха; пучок выходит из окна, закрытого тонкой алюминиевой фольгой.

Бетатрон

Циклотрон является одним из самых остроумных физических приборов. Ему в значительной мере обязана своими успехами современная ядерная физика. Именно циклотрон дал в руки учёных те «снаряды», которые были так необходимы для изучения свойств атомных ядер. Однако и он оказался не вполне совершенным.

Чтобы было ясно, в чём дело, обратим снова наше внимание на формулу (10), которая определяет период обращения заряженной частицы в магнитном поле. Как видно из этой формулы, период обращения ускоряемых частиц зависит не только от величины магнитного поля, но также и от массы движущейся частицы. Для того чтобы частица получала энергию от переменного электрического поля, нужно, чтобы она проходила это поле в определённые моменты времени — тогда, когда направление электрического поля совпадает с направлением её движения, ибо иначе эта частица может не только не ускориться электрическим полем, но даже замедлиться. Так как период времени, в течение которого происходит изменение электрического поля, строго постоянен, то необходимо, чтобы период движения частицы также не изменялся. Однако, как это следует из формулы (10), период движения частицы зависит также и от её массы. Но масса частицы не есть величина постоянная. Она приблизительно постоянна только при малых скоростях, т. е. при малых энергиях частицы. При достаточно больших энергиях масса частицы начинает заметно расти; чем больше становится энергия частицы, тем больше отличается масса от значения, которое имеет покоящаяся частица. С изменением массы частицы меняется и период её движения по кругу, всё более и более увеличиваясь. Частица начинает запаздывать к промежутку между половинками камеры, где находится электрическое поле. Сначала это запаздывание приводит к тому, что частица проходит электрическое поле не в момент, когда разность потенциалов наибольшая, а несколько позже. При этом она получает от электрического поля несколько меньшую энергию. Однако в дальнейшем запаздывание возрастает настолько, что частица начинает попадать в электрическое поле тогда, когда оно будет направлено в противоположную сторону. В этом случае частица

начнёт терять накопленную энергию. Чтобы не допустить этого, приходится прерывать движение частицы после того, как она ускорилась до такого значения энергии, при котором её масса начинает достаточно сильно меняться.

Это предельное значение энергии не одинаково для всех частиц. Оно зависит от скорости частицы, а следовательно, и от её массы. Так, масса протона уже заметно меняется при энергии в несколько миллионов электрон-вольт. Поэтому, например, для ускорения протонов до энергии, превышающей 10 миллионов электрон-вольт, приходится прибегать к различным ухищрениям. Дейтроны, обладающие бо́льшей массой, чем протоны, можно ускорять до бо́льших значений энергии. Ещё легче получать искусственные альфа-частицы больших энергий. При их ускорении затруднения с изменением массы начинают возникать только после энергий в двадцать миллионов электрон-вольт.

Совсем иначе дело обстоит для электронов. Их масса мала, почти в две тысячи раз меньше массы протона. Уже при энергии в 10 000—20 000 электрон-вольт скорость их становится близкой к скорости света, и начинает заметно сказываться изменение массы с увеличением энергии электрона. Совершенно ясно поэтому, что циклотрон не может быть применён для ускорения электронов.

Долгое время считали, что для ускорения электронов нет других путей, кроме непосредственного применения высокого напряжения. Однако в 1940 г. Керсту удалось добиться первых успехов в ускорении электронов без применения высокого напряжения.

В приборе, построенном Керстом, использовалось явление электромагнитной индукции. Напомним, в чём состоит это явление. Если взять круговой контур (проводник) ABC (рис. 33) и поместить его в переменное магнитное поле так, что поток магнитных силовых линий, проходящих через этот контур, будет меняться, то при изменении магнитного потока в контуре ABC будет индуцироваться электродвижущая сила индукции $\mathcal{E}$, зависящая от быстроты изменения магнитного потока. Электродвижущая сила в контуре ABC возникает вследствие того, что вокруг изменяющегося магнитного поля появляется электрическое поле, силовые линии которого имеют вид замкнутых кривых (например, окружностей).

Если заставить заряженную частицу двигаться по такой кривой (например, по ABC), то во всё время изменения магнитного потока она будет ускоряться, если направление её движения будет совпадать с направлением силовых линий индуцированного электрического поля. Совершив полный оборот, такая частица приобретёт энергию, равную $e\mathscr{E}$ (e — заряд частицы, $\mathscr{E}$ — величина электродвижущей силы индукции). Если бы мы сумели заставить частицу пробежать

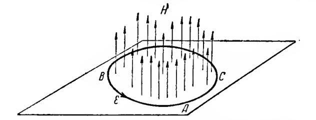


Рис. 33. При изменении магнитного потока в контуре ABC возникает электродвижущая сила индукции.

по кругу ABC дважды, то приобретённая ею энергия увеличилась бы до $2e\mathscr{E}$. После 10 оборотов частица имела бы энергию $10e\mathscr{E}$ (конечно, при условии, что в процессе этого движения магнитное поле менялось бы с постоянной скоростью) и т. д.

Для того чтобы заряженная частица за один оборот набрала большую энергию, необходимо контуру ABC придавать большие размеры и заставлять магнитное поле меняться с большой скоростью. Однако даже и в том случае, если энергия, приобретаемая заряженной частицей в течение одного оборота, окажется небольшой — всего лишь несколько электрон-вольт, можно ускорить частицу до энергий в несколько миллионов электрон-вольт, если заставить её совершить несколько миллионов оборотов по окружности ABC.

Следовательно, для ускорения заряженных частиц индукционным электрическим полем надо заставить эти частицы совершить большое количество оборотов вокруг меняющегося магнитного потока. Мы уже знаем, как заставить заряженную частицу двигаться по окружности. Для этого

необходимо, чтобы *траектория частицы находилась в магнитном поле.* Подобрав надлежащим образом величину этого магнитного поля, мы можем заставить частицу с данной энергией описать окружность заданного радиуса.

Таким образом, для осуществления индукционного ускорения надо иметь два магнитных поля: одно переменное магнитное поле, вокруг которого частица движется,— это поле ускоряет частицу; другое магнитное поле должно быть в тех местах, где проходит траектория ускоряемой частицы; это поле управляет движением частицы, заставляя её двигаться по окружности заданного радиуса.

Каким же должно быть управляющее магнитное поле? Очевидно, оно также должно быть переменным во времени. В самом деле, энергия частицы, движущейся вокруг ускоряющего магнитного поля, с течением времени непрерывно растёт. Если бы при этом управляющее магнитное поле оставалось постоянным, то радиус траектории, описываемой частицей, непрерывно увеличивался бы по мере ускорения частицы так же, как и в циклотроне. Изменение радиуса кривизны траектории частицы, движущейся в постоянном магнитном поле с переменной энергией, определяется формулой (9), которой мы не раз уже пользовались. Эта же формула указывает нам способ, при помощи которого можно достигнуть того, чтобы ускоряющаяся заряженная частица двигалась в магнитном поле по кругу постоянного радиуса. Для этого нужно, чтобы по мере увеличения энергии частицы увеличивалась и напряжённость магнитного поля, причём так, чтобы отношение mu/He оставалось неизменным. Если бы нам удалось этого добиться, то заряженная частица могла бы двигаться по окружности определённого радиуса до тех пор, пока отношение mu/He оставалось бы неизменным.

Для того чтобы отношение mu/He оставалось постоянным, необходимы следующие условия:

1) ускоряющее и управляющее магнитные поля должны во времени меняться согласованно, по одному и тому же закону;

2) напряжённость управляющего магнитного поля должна равняться половине среднего значения напряжённости ускоряющего магнитного поля.

Кроме этих условий, для осуществления ускорения нужно, чтобы оба магнитных поля менялись всё время в одном

направлении (например возрастали). Это требование вызвано тем, что направление индуцированного электрического поля зависит от знака изменения магнитного поля. При возрастании магнитного поля направление индуцированного электрического поля будет противоположно тому, которое имеет место при убывании магнитного поля. Если ускоряющее магнитное поле будет то возрастать, то убывать, то и частица будет то ускоряться, то тормозиться. Чтобы избежать этого, надо применять монотонно меняющееся магнитное поле. Это обстоятельство накладывает известное ограничение на энергию ускоряемой частицы. В самом деле, мы не можем монотонно менять магнитное поле как угодно долго. Магнитное поле может возрастать только до некоторого значения (если магнитный поток создаётся в железе, то величина предельного магнитного потока определяется насыщением железа). После этого магнитное поле или будет постоянным или даже начнёт уменьшаться, если мы будем питать намагничивающую обмотку переменным током. Следовательно, в индукционном ускорителе процесс ускорения частицы должен длиться вполне определённый промежуток времени, после чего ускоряемая частица должна выводиться из ускорителя, ибо иначе она начнёт тормозиться.

Какую же энергию успеет накопить ускоряемая частица за этот промежуток времени? Зависит ли эта энергия от частоты переменного тока? На первый взгляд может показаться, что чем больше частота переменного тока, тем бóльшую энергию наберёт электрон в процессе ускорения, ибо чем больше частота, тем быстрее меняется магнитный поток, а чем быстрее меняется магнитный поток, тем больше величина индуцируемой электродвижущей силы, а с ней и энергия, которую приобретает заряд за время одного оборота вокруг меняющегося магнитного поля.

Однако в действительности частота переменного тока не оказывает влияния на конечную энергию ускоряемой частицы. Хотя энергия частицы, приобретаемая ею за время одного оборота, и возрастает при увеличении частоты переменного тока, но так как возрастание величины магнитного потока ограничено насыщением железа, то при более быстром нарастании магнитного поля этот предел будет достигаться быстрее, следовательно, длительность ускорения заряда будет меньшей. Итак, при большей частоте перемен-

ного тока возрастает энергия, приобретаемая зарядом в течение одного оборота, но уменьшается число оборотов. Более строгий расчёт показывает, что максимальная энергия, которую может приобрести заряд в процессе такого индукционного ускорения, не зависит от частоты изменения магнитного поля, а зависит от:

1) абсолютной величины изменения магнитного потока, проходящего сквозь орбиту, описываемую движущимся зарядом. Чем больше будет это изменение, тем бо́льшую энергию приобретёт частица;

2) от времени, в течение которого частица успевает сделать один оборот по орбите. Чем больше радиус этой орбиты, тем большее время затратит частица на движение вокруг магнитного поля (при данном максимальном значении потока) и тем меньшую энергию она приобретёт в результате ускорения. На время движения вокруг магнитного поля будет влиять также и масса движущейся частицы. Чем больше масса, тем меньше (при данной энергии) скорость частицы, тем меньшую энергию она приобретёт за время ускорения.

Итак, для осуществления индукционного ускорения мы должны заставить заряженные частицы совершить громадное число оборотов вокруг переменного магнитного потока. Совершенно естественно, что ускоряемые частицы должны двигаться в хорошем вакууме. Всякое столкновение с молекулами воздуха приведёт к тому, что изменится нужное соотношение между энергией частицы и величиной управляющего магнитного поля. Поэтому индукционное ускорение осуществляется в кольцевой трубке (имеющей форму тора), откачиваемой при помощи системы вакуумных насосов до наилучшего вакуума.

Однако этого ещё недостаточно, чтобы частица могла совершить несколько миллионов оборотов, не попав на стенки кольцевой трубки. Нужно было осуществить условия, придающие движению заряженной частицы устойчивый характер. При устойчивом движении частица, незначительно отклонившаяся от правильного пути, не сбивается с него совершенно, а наоборот, автоматически возвращается на правильный путь. Отсутствие устойчивости движения было главной причиной неудач при ранних попытках осуществления индукционного ускорителя. Керст впервые показал, что если сделать управляющее поле *меняющимся ещё и в про-*

странстве, причём так, чтобы оно уменьшалось от центра к краю, то в таком управляющем поле движение ускоряемых частиц становится устойчивым, и они оказываются в состоянии совершать вокруг изменяющегося магнитного потока громадное число оборотов, двигаясь при этом всё время по определённой орбите. Эту орбиту принято называть равновесной.

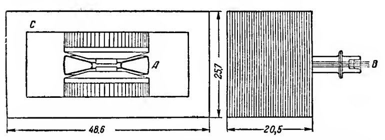


Рис. 34. Схема первого бетатрона Керста на 2,3 миллиона электрон-вольт (размеры указаны в *см*).

А — кольцевая трубка, в которой ускоряются электроны; *В* — патрубок, через который вводится нить, излучающая электроны; *С* — сердечник магнита.

Работа Керста увенчалась успехом. Первая установка, в которой электроны ускорялись до 2,3 миллиона электрон-вольт, названная бетатроном, оказалась столь миниатюрной, что свободно умещалась на лабораторном столе. На рис. 34 показано устройство и размеры этого бетатрона, а на рис. 35 — его общий вид. По своей конструкции бетатрон похож на обыкновенный трансформатор, в котором вторичная обмотка удалена и заменена кольцевой камерой, где движутся ускоряемые частицы.

Простота, дешевизна и сравнительная лёгкость осуществления делают бетатроны незаменимым орудием в руках исследователей. Учёные тотчас же приступили к изучению и к использованию открывшихся новых возможностей. Спустя год после появления первого бетатрона на 2,3 миллиона электрон-вольт появился бетатрон, в котором удалось разогнать электроны до энергий в 20 миллионов электрон-вольт.

В этом бетатроне радиус равновесной орбиты равен 19 *см*. В процессе ускорения электроны совершают около 350 000 оборотов, проходя путь длиной около 420 *км*. В настоящее

время построен бетатрон, дающий электроиы с эиергией в 100 миллионов электрон-вольт. Рис. 36 воспроизводит его вид.

Бетатрон — замечательный прибор; его изобретеиие, так же как и изобретеиие циклотроиа, открыло иовый этап в изучеиии атомных ядер. Однако и его возможиости имеют определёииые граиицы. Бетатрон пригодеи только для уско-

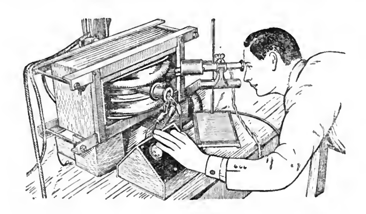


Рис. 35. Внешний вид бетатрона на 2,3 миллиона электрон-вольт.

рения лёгких частиц — электроиов. Ускорять тяжёлые частицы — протоны, дейтроны или альфа-частицы — при помощи бетатроиа нецелесообразио. Вспомним, что ускорение частицы будет совершаться в течеиие определёииого промежутка времеии. За это время частица должиа совершить большое количество оборотов. Чем больше оиа сделает оборотов, тем бóльшую кииетическую эиергию приобретёт. Ясио, что чем больше масса частицы, тем меньше при даиной кииетической эиергии будет её скорость. Следовательио, такая частица затратит больше времеии на обращение вокруг перемеиного магнитного потока и за время возрастания потока успеет совершить меньшее число оборотов, в результате чего получит меиьшую эиергию. Поэтому бетатрон, будучи весьма эффективиым прибором для ускорения электроиов, мало пригодеи для ускореиия более тяжёлых частиц.

В силу специфических особенностей циклотрона и бетатрона создалось своеобразное «разделение труда». Циклотроном ускоряют «тяжёлые» частицы, бетатроном — электроны.

Создание бетатрона позволило сообщать электронам большую энергию. Возможности бетатрона в этом отношении несравнимы с тем, что даёт электростатический генератор.

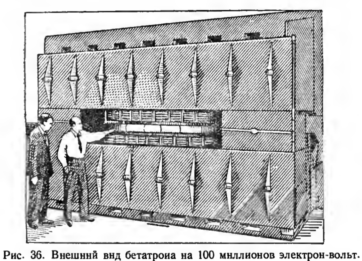


Рис. 36. Внешний вид бетатрона на 100 миллионов электрон-вольт.

Однако и они имеют предел. На существование этого предела было указано Д. Д. Иваненко и И. Я. Померанчуком. Они обратили внимание на то, что электроны, движущиеся внутри бетатрона, должны вследствие ускорения, которое имеет место при движении по круговой орбите, излучать электромагнитные волны*). Чем больше энергия, до которой ускорен электрон, тем больше будет интенсивность излучаемых им волн. При очень большой энергии электрона интенсивность излучения делается настолько значительной, что потеря энергии электроном вследствие излучения становится сравнимой с энергией, приобретаемой электроном вследствие

*) Из законов электродинамики следует, что всякий заряд, движущийся с ускорением, должен излучать электромагнитные волны.

измеиеиия магиитного поля. Естествеиио, что когда прирост энергии вследствие ускорения и её уменьшение вследствие излучения сделаются равными, увеличение эиергии электрона прекратится. Согласно первоначальным подсчётам этот предел наступает приблизительио около 500 миллиоиов электрои-вольт. Однако в действительности, как указали Л. А. Арцимович и И. Я. Померанчук, ускорение электрона в бетатроне прекратится раньше того момента, при котором потеря эиергии электрона иа излучение сделается равной эиергии, получаемой электроиом вследствие ускорения. Чтобы понять, каким образом излучение ограиичивает эиергию, до которой может быть ускореи электрон, вспомним, что в бетатроне электрои движется во всё время ускорения по постоянной орбите (так называемая равновесная орбита). Движение по постояиной орбите возможно потому, что магнитное поле, в котором движется электрон, возрастает по мере увеличения его энергии. Изменение энергии электроиа и изменение величины магнитиого поля должны быть строго согласованы. Как указывает формула (9), управляющее магиитиое поле в бетатроне должно расти в соответствии с ростом количества движения электроиа. Однако вследствие излучения энергия электрона будет возрастать медлеииее, чем это должно быть благодаря изменению магнитного потока. Количество движения электрона будет возрастать медленнее, чем возрастает управляющее магнитное поле. Магиитное поле иачнёт отклонять электроиы сильнее, благодаря чему радиус его траектории начнёт уменьшаться, и вместо движения по равиовесной орбите электрон начнёт описывать спираль, свёртывающуюся к центру. Чем больше будет излучение, тем быстрее будет свёртываться спираль. В конце коицов электрои наткнётся на стенку той трубки, в которой производится его ускорение.

Подробный анализ влияния, производимого излучением иа ускореиие электронов в бетатроне, был произведён Л. А. Арцимовичем и И. Я. Помераичуком, а также Д. Д. Иваненко и А. А. Соколовым. Оии установили, что энергия, теряемая на излучение, зависит от радиуса равиовесной орбиты и возрастает как четвёртая степень энергии электрона. При ускорении электроиов до 100 миллионов электрон-вольт потери иа излучение ещё ие играют большой роли, и радиус равновесной орбиты измеияется всего лишь на несколько

сантиметров. Одиако при дальиейшем увеличении эиергии электрона измеиеиие радиуса равиовесиой орбиты иачииает сильио возрастать, что и приводит к попадаиию электронов иа стеики трубки.

Итак, электроиы, ускоряемые в бетатроие, излучают *электромагнитные волны.* Мы уже раиее упомииали (стр. 80), что и видимый свет тоже представляет собой электромагиитные волиы вполие определёииого диапазона частот. Не могло ли оказаться, что при каких-либо условиях ускореиия электромагнитные волиы, испускаемые электроиами в бетатроие, сделаются видимыми? Оказалось, что это возможио.

Частота излучеиия, испускаемого электроиом, зависит от энергии его движеиия по равиовесиой орбите. При радиусе равиовесной орбиты, равном 30 *см*, электроны, ускорениые до 30 миллиоиов электрои-вольт, должны испускать электромагиитиые волиы, имеющие частоту порядка $4 \cdot 10^{14}$. Лучи такой частоты иаходятся в красиой части видимого спектра. При ускореиии электроиов до 80 миллиоиов электрон-вольт частота электромагиитиого излучения достигает величииы порядка 10^{15}—10^{16}. Это будут лучи, прииадлежащие к ультрафиолетовой части спектра. Итак, мы приходим к замечательиому выводу — электроиы, ускореиные в бетатроие до эиергий в иесколько десятков миллиоиов электроивольт, должны излучать видимый свет. Это будут «светящиеся» электроны. Для их обиаружения нам ие иадо будет прибегать к каким-либо ухищреииям, иапример, пользоваться камерой Вильсоиа или счётчиком Гейгера-Мюллера. Электроиы будут видиы иевооружённым глазом.

Существование таких «светящихся» электронов вскоре подтвердилось. Было обиаружеио, что электроиы, ускореииые до 30 миллиоиов электрон-вольт, иачинают излучать видимый свет: электроииый пучок имел вид темиокрасиой полоски. При энергии в 80 миллиоиов электрон-вольт электроиный пучок представлял собой яркую блестящую полоску голубовато-белого цвета.

Изобретение бетатрона и циклотроиа позволило ускорять заряжениые частицы (электроны, протоиы и иоиы гелия) до весьма больших эиергий. Предел, до которого можно было ускорить частицы, пользуясь высоковольтными устаиовками (3—5 миллионов электрои-вольт), отодвинулся весьма далеко. Оказалось возможным сообщать заряжеииым частицам

энергию до 100 миллионов электрон-вольт. Однако и это не удовлетворило учёных. Открытие в составе космического излучения мезонов и установление наличия сильного взаимодействия между мезонами и атомными ядрами выдвинуло на очередь вопрос о создании таких ускорителей, в которых энергию ускоряемых частиц можно было увеличить до космических масштабов — до величин порядка 1 миллиарда электрон-вольт. Необходимость построения таких установок заставила учёных совершенствовать идеи ускорения частиц, заложенные в циклотроне и бетатроне.

Новые типы ускорителей заряженных частиц

Интересное развитие идеи ускорения частиц переменным полем было предложено советским физиком В. И. Векслером и независимо от него американским физиком Мак-Милланом. Как уже указывалось, увеличение энергии в бетатроне ограничено потерей энергии на излучение. Электрон за время обращения вокруг магнитного потока приобретает слишком мало энергии, всего лишь несколько электрон-вольт. Нельзя ли заставить электрон приобретать за один оборот не несколько электрон-вольт, а несколько тысяч электрон-вольт, т. е. столько, сколько приобретает заряженная частица, ускоряемая в циклотроне. В этом случае предельное значение энергии для электронов значительно увеличилось бы. Но ускорять электроны в циклотроне нельзя, потому что масса их меняется с энергией, следовательно, период их обращения не будет постоянен. Однако уже при энергии в один миллион электрон-вольт скорость электрона достигает значения только на 5% меньшего скорости света. Поскольку скорость света есть предел для скорости движения частицы, то ясно, что увеличение энергии электрона выше одного миллиона электрон-вольт практически не изменяет его скорости. Значит, если электрон будет двигаться по окружности постоянного радиуса, то он будет описывать окружность за одно и то же время. Постоянство времени обращения делает возможным ускорение переменным полем. Отсюда и родилась идея синхротрона — прибора, комбинирующего свойства бетатрона и циклотрона.

В синхротроне электрон сначала ускоряется так же, как и в бетатроне, т. е. при помощи возрастающего маг-

нитного поля. Когда энергия электрона достигнет величины порядка одного миллиона электрон-вольт, включается в действие схема ускорения переменным электрическим полем, так же как и в циклотроне. Электрон начинает набирать энергию за счёт переменного электрического поля. Изменение магнитного поля при этом происходит лишь в такой мере, чтобы электрон попрежнему удерживался на постоянной круговой орбите. Синхротрон позволяет сообщить электронам значительно бо́льшие энергии, чем те, которые могут быть достигнуты в бетатроне. При помощи синхротрона можно ускорить электроны до энергии 200—300 миллионов электрон-вольт.

Изобретение синхротрона позволило увеличить предельное значение энергии, сообщаемой электронам. Но как увеличить предел энергии, сообщаемой более тяжёлым частицам — протонам, дейтронам, альфа-частицам? Векслер нашёл пути для решения и этой задачи.

Напомним ещё раз, что предел ускорения ионов в циклотроне обусловлен изменением массы частицы. Постоянство периода обращения, равного $\frac{2\pi m}{eH}$ [формула (10)], с изменением массы нарушается, а вместе с тем нарушается синхронизм движения частицы и изменения электрического поля. Выход из этого затруднения и был указан Векслером. Он предложил менять период изменения электрического поля по тому же закону, по которому происходит изменение массы ускоряемой частицы. Приборы, построенные по этому принципу, получили название «синхроциклотронов» (или фазотронов). Синхроциклотрон позволяет значительно увеличить предельное значение энергии, которую можно сообщить тяжёлым заряженным частицам.

В 1949 г. в Лаборатории ядерных проблем Академии наук СССР, под руководством М. Г. Мещерякова, Д. В. Ефремова и А. Л. Минца был построен синхроциклотрон, который сообщает протонам энергию до 680 миллионов электрон-вольт. Синхроциклотрон Академии наук СССР является наиболее мощным из всех ускорителей этого типа.

Постройка синхроциклотрона является весьма сложным делом. Достаточно сказать, что полюсные наконечники магнита синхроциклотрона Академии наук СССР имеют диаметр около 6 *м*. Сооружение такого магнита отнимает

много труда и средств. Синхротрон является более простым прибором, потому что в нём ускоряемая частица движется всё время по равновесной орбите. Поэтому нет необходимости создавать магнитное поле во всём пространстве внутри равновесной орбиты. Достаточно создать магнитное поле только на самой орбите и в области, близко к ней примыкающей. Это существенным образом облегчает конструкцию магнитов, предназначенных для ускорения частиц до очень больших энергий. Их объём и стоимость резко снижаются. Синхротрон на большие энергии будет стоить значительно дешевле синхроциклотрона.

Возникает, однако, естественный вопрос. Мы говорили, что синхротрон предназначен для ускорения электронов. Возможно ли ускорять при помощи синхротрона и тяжёлые частицы — протоны или ядра гелия? Оказывается, что возможно. Для этого нужно несколько изменить процесс ускорения частиц.

Мы уже указывали, что основным затруднением при ускорении тяжёлых частиц в индукционном ускорителе является то, что тяжёлые частицы движутся медленно, период обращения их слишком велик, поэтому за время изменения магнитного потока они приобретут слишком мало энергии. Но в синхротроне частицы в основном ускоряются не индукционным способом, а переменным электрическим полем. Поэтому энергия, накапливаемая заряженной частицей (протонсм или альфа-частицей), уже не связана со временем изменения магнитного потока.

Каким же образом можно применить переменное поле для ускорения протонов? Ведь мы указывали, что ускорение переменным полем основывается на приблизительном постоянстве скорости у электронов большой энергии (точнее на практической независимости их скорости от энергии); однако у тяжёлых частиц в диапазоне энергий до 100 миллионов электрон-вольт скорость с изменением энергии меняется весьма значительно и получение равновесной орбиты оказывается невозможным. Чтобы применить к протонам метод ускорения, используемый в синхротроне, надо сначала сообщить им энергию в несколько десятков миллионов электрон-вольт, а затем уже ускорять их переменным электрическим полем. Для первоначального ускорения тяжёлых частиц можно применить приём, используемый в синхро-

циклотронах, т. е. ускорить частицы переменным полем, частота которого меняется так, чтобы обеспечить синхронизм между движением частицы и ускоряющим переменным электрическим полем.

Синхротрон, как мы видим, обладает универсальными свойствами. Он пригоден не только для ускорения электронов до больших энергий, но также и для ускорения протонов. Более того, ускорение протонов в синхротроне не ограничено излучением, ибо интенсивность электромагнитных волн, излучаемых заряженной частицей, движущейся с ускорением, обратно пропорциональна четвёртой степени её массы. Следовательно, излучение протонов будет в 10^{12}—10^{13} раз меньше, чем излучение электронов. Это значит, что им можно пренебречь даже при ускорении до сотен миллиардов электрон-вольт.

При ускорении протонов до энергий, бóльших миллиарда электрон-вольт, лучше пользоваться переменным электрическим полем, частоту которого можно несколько изменять (как это делается в синхроциклотроне).

Устройство, при котором частица ускоряется переменным электрическим полем с изменяющейся частотой, а удерживается на орбите постоянного радиуса при помощи переменного во времени магнитного поля, получило название «синхрофазотрон». Чтобы дать читателю представление о том, что представляют собой ускорители частиц на миллиарды электрон-вольт, мы опишем два таких ускорителя — Брукхэйвенский синхрофазотрон, построенный в 1953 г. в США и названный космотроном *), и советский синхрофазотрон электрофизической лаборатории Академии наук СССР.

Схема космотрона приведена на рис. 37. Камера ускорителя представляет собой кольцевую трубу прямоугольного сечения. Средний радиус R этой трубы равен 9 *м*. Окружность такого радиуса и является равновесной орбитой. Ширина кольцевой трубы равна 75 *см*. Камера помещается между полюсами кольцевого электромагнита. Магнит космотрона не является сплошным, а состоит из четырёх секций. Между секциями частица движется по прямой линии. Длина каждого из прямолинейных участков равна 3 *м*.

*) «Космотроном» этот ускоритель назван потому, что он способен сообщать частицам энергии, с которыми мы имеем дело в космических лучах.

В зазорах, отмеченных буквой C, происходит ускорение частицы. Здесь частица проходит промежуток, в котором создаётся электрическое поле. Поле меняется со временем по закону $E = E_0 \sin \omega t$, а частота его ω подбирается так, чтобы частица проходила это поле в определённые моменты времени, когда направление действия поля совпадает с направлением движения частицы.

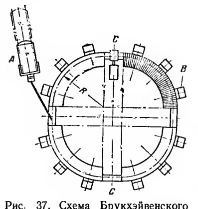


Рис. 37. Схема Брукхэйвенского космотрона.

В космотрон запускаются протоны, обладающие энергией 3,5 миллиона электрон-вольт. Эту энергию сообщает им электростатический генератор A. Большая начальная энергия протонов сильно облегчает их дальнейшее ускорение. Скорость протона при энергии 3,5 миллиона электрон-вольт составляет одну десятую от скорости света. Поэтому частота обращения протонов при их дальнейшем ускорении уже не будет значительно меняться. В Брукхэйвенском космотроне частота изменения ускоряющего переменного поля меняется от 370 000 (начало ускорения) до 4 миллионов циклов в секунду (конец ускорения). Изменение частоты осуществляется синхронно с изменением энергии протонов так, чтобы движение протонов происходило вблизи равновесной орбиты. В процессе ускорения протоны совершают около 3 миллионов оборотов, приобретая при каждом обороте энергию, равную 800 электрон-вольтам. Каждая секция магнита набрана из 864 отдельных пластин толщиной 12,5 *мм*. Вес всего магнита около 2000 *т*. Намагничивающая обмотка магнита состоит из 48 охлаждаемых водой витков, через которые пропускается ток силой до 7000 *а*. Для питания такого магнита нужна целая электростанция. Потребляемая им мощность составляет 26 000 киловольтампер.

Для создания в камере нужного вакуума используются 12 мощных диффузионных насосов. На рис. 37 один из этих

насосов обозначен буквой *B*. Диффузионные насосы космотрона способны ежесекундно откачивать до 4 *м*³ воздуха. Объём ускорительной камеры составляет около 33 *м*³.

Внешний вид Брукхэйвенского космотрона показан на рис. XXV в конце книги. В Брукхэйвенском космотроне протоны могут приобрести энергию до 2,9 миллиарда электрон-вольт.

В нашей стране построен самый мощный в мире ускоритель — синхрофазотрон, способный сообщать протонам энергию в 10 миллиардов электрон-вольт. Создание этого ускорителя — выдающееся достижение советской научно-технической мысли. Постройка синхрофазотрона осуществлена в электрофизической лаборатории Академии наук СССР под руководством В. И. Векслера, Д. В. Ефремова и А. Л. Минца.

Кольцевой магнит советского синхрофазотрона имеет диаметр около 60 *м* и весит 36 000 *т*. В ускорительную камеру синхрофазотрона вводятся протоны с энергией 9 миллионов электрон-вольт, предварительно разогнанные в линейном ускорителе. Мощность устройства, питающего током электромагнит, достигает 140 000 киловатт. Для откачки воздуха из ускорительной камеры используется 56 мощных насосов.

Внешний вид этого синхротрона показан на рис. XXVI в конце книги.

В настоящее время в нашей стране ведутся работы по проектированию ещё более мощных ускорителей, способных разгонять протоны до энергии в 50 миллиардов электрон-вольт.

ГЛАВА VII

ИСКУССТВЕННАЯ РАДИОАКТИВНОСТЬ

Открытие искусственной радиоактивности

1934 г. ознаменовался новым важным открытием. Честь этого открытия принадлежит Фредерику и Ирэн Жолио-Кюри. Вот как это произошло.

В главе IV мы писали об открытии нейтронов. Нейтроны были обнаружены при действии альфа-частиц на бериллий. Супруги Жолио-Кюри стали систематически изучать, какие вещества могут под действием альфа-частиц испускать нейтроны. Они нашли, что при бомбардировке альфа-частицами таких веществ, как алюминий и магний, наблюдается появление нейтронов.

Испускание нейтронов алюминием было особенно интересным. Интерес к этому случаю вызывался тем, что алюминий, как это хорошо было известно со времени первых опытов по расщеплению ядер, при бомбардировке альфа-частицами испускает протоны. Результатом превращения ядра алюминия было образование кремния. Вот схема этого превращения:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si} + ^{1}_{1}\mathrm{H}.$$

Теперь же оказалось, что под действием альфа-частиц алюминий испускает не только протоны, но также и нейтроны. Если бы алюминий состоял из смеси нескольких изотопов, то такой результат не вызвал бы особого удивления. Можно было бы думать, что разные изотопы преобразуются под действием альфа-частиц различным образом. Одни изотопы испускают в процессе превращения протоны, другие — нейтроны. Между тем хорошо известно, что у алюминия только один изотоп. Это означает, что и нейтроны и протоны наверняка появляются в результате превращения, происходя-

щего с ядрами алюминия 27. Две различные частицы, вылетающие из одного ядра,— это было нечто новое. Можно было по этому поводу сделать два предположения:

1) Нейтрон и протон возникают из ядра алюминия одновременно. Если это так, то схема превращения ядра алюминия, предложенная Резерфордом, была неправильной. Ядерная реакция должна итти иначе, именно:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}+^{4}_{2}\mathrm{He}\rightarrow {}^{29}_{14}\mathrm{Si}+^{1}_{1}\mathrm{H}+^{1}_{0}n,$$

т. е. продуктом превращения также был бы изотоп кремния, но не 30, а 29.

2) Нейтроны возникают независимо от протонов. Тогда должно существовать два различных способа превращения ядер алюминия. Один из них нам уже известен — он приводит к образованию протона, а другой может быть записан так:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}+^{4}_{2}\mathrm{He}\rightarrow {}^{30}_{15}\mathrm{P}+^{1}_{0}n;$$

он приводит к образованию нейтрона. Одни ядра испытывают превращения по одному способу, другие — по другому.

Для того чтобы разобраться в том, какое из двух сделанных предположений правильно, нужно было провести дальнейшее изучение превращений ядер алюминия под действием альфа-частиц. Это изучение и было предпринято Жолио-Кюри. Они поместили алюминий в камеру Вильсона и стали наблюдать следы частиц, образующихся при превращении его ядер. Совершенно неожиданно наряду с «жирными» следами, которые естественно было приписать протонам, они заметили тонкие линии, похожие на следы электронов. Природа этих электронов была неясной. Чтобы разобраться в ней, Жолио-Кюри решили поместить камеру Вильсона в магнитное поле и снова повторить исследование. В магнитном поле следы частиц изогнулись, однако не так, как это сделали бы электроны. Следы изгибались в направлении, соответствующем положительному заряду. Анализируя свои снимки, супруги Жолио-Кюри поняли, что частицы, образующие такие следы, были позитронами. Это был поразительный результат — оказалось, что позитроны, незадолго до этого открытые Андерсоном в составе космического излучения, могут возникать и на Земле. Однако этот

вывод оказался не единственным следствием опытов Жолио-Кюри.

Вернёмся снова к вопросу о превращении алюминия. Разрешили ли опыты супругов Жолио-Кюри, вопрос о характере превращения алюминия? На первый взгляд казалось, что не только не разрешили, но, наоборот, даже усложнили. Оказалось, что при действии альфа-частиц из ядра алюминия вылетают не только протоны и нейтроны, но также и позитроны. Теперь надо было уже решить вопрос о том, возникают ли сразу все три частицы или каждая из них возникает порознь, или, может быть, какие-нибудь две частицы вылетают из ядра одновременно. Жолио отбросил мысль о возможности вылета из ядра алюминия сразу трёх частиц — протона, нейтрона и позитрона. Такой процесс был бы слишком невыгодным с энергетической точки зрения. Он обратил внимание на то обстоятельство, что позитрон и нейтрон вместе обладают таким же зарядом и примерно такой же массой, как и протон. Это дало ему основание предположить существование следующих способов превращения алюминия:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si} + ^{1}_{1}\mathrm{H},$$

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si} + ^{1}_{0}n + ^{0}_{+1}e \text{ (позитрон).}$$

В результате обоих превращений из алюминия образуется одно и то же вещество — кремний 30, только при одном способе превращения вылетают протоны, а при другом способе превращения — две частицы — позитрон и нейтрон. Предположение Жолио выглядело весьма правдоподобно, однако, дальнейшие исследования показали, что оно не совсем верно. Совершенно неожиданно было обнаружено, что позитроны возникают не только тогда, когда алюминий подвергается бомбардировке альфа-частицами, но и некоторое время спустя. Так, оказалось, что если облучить алюминий альфа-частицами, а затем источник альфа-частиц убрать, то испускание протонов и нейтронов тотчас же прекратится, в то время как испускание позитронов не прекращается. Позитроны продолжают вылетать из алюминия. Однако число их постепенно уменьшается. Через каждые три с четвертью минуты количество позитронов, вылетающих (за единицу времени) из алюминия, уменьшается вдвое.

Это было очень похоже на явление радиоактивного распада. Отличие состояло лишь в том, что в процессе этого радиоактивного распада возникают не электроны и не альфа-частицы, а позитроны. Период полураспада в $3^1/_4$ минуты также отличался от периодов полураспада ранее известных радиоактивных превращений. И наконец, самым замечательным было то, что этот радиоактивный распад возникал не сам по себе, а целиком создавался экспериментаторами.

Возникновение нейтронов и позитронов было обнаружено не только у алюминия. Жолио-Кюри обнаружили, что бор и магний также испускают и нейтроны и позитроны при бомбардировке их альфа-частицами. Конечно, надо было тотчас же проверить, как ведут себя и эти вещества. Не наблюдается ли у них радиоактивный распад, т. е. появление позитронов после облучения альфа-частицами? Опыты показали, что позитронный радиоактивный распад есть и у бора и у магния. Когда подвергли бор облучению альфа-частицами, а затем источник альфа-частиц убрали, то сразу же заметили, что испускание позитронов не прекратилось, а продолжалось с постепенным понижением интенсивности. Уменьшение числа позитронов у бора было более медленным, чем у алюминия. Лишь спустя четырнадцать минут число позитронов, вылетающих в единицу времени, уменьшалось вдвое.

Магний вёл себя аналогичным образом. И он после бомбардировки альфа-частицами испускал позитроны. Время, в течение которого интенсивность излучения уменьшалась наполовину, оказалось равным двум с половиной минутам.

Итак, возбуждение искусственного радиоактивного распада оказалось реальностью. Явление, на ход которого в начале нашего столетия учёные были бессильны как-либо повлиять, в 1934 г. было искусственно создано в лаборатории. Жолио-Кюри получили три искусственных радиоактивных вещества:

у алюминия (период полураспада 3,25 минуты),
у магния (период полураспада 2,5 минуты),
у бора (период полураспада 14 минут).

Что же было причиной искусственного радиоактивного распада? Какие вещества распадались? Ясно было, что это не алюминий, не бор и не магний. Ибо хорошо было известно, что эти вещества до облучения их альфа-частицами никаких

признаков радиоактивного распада не обнаруживали. Совершенно очевидно, что это были какие-то новые вещества, ранее неизвестные.

Предположение о том, что нейтроны и позитроны возникают одновременно, было, очевидно, неверным. Позитроны возникали после облучения, а нейтроны и протоны наблюдались только во время облучения исследуемых веществ альфа-частицами. Если нейтроны и позитроны возникают раздельно, то их появление можно описать последовательными ядерными реакциями. Так, у алюминия нейтроны возникают в результате превращения

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}+^{4}_{2}\mathrm{He}\rightarrow ^{30}_{15}\mathrm{P}+^{1}_{0}n;$$

следствием такого превращения является образование изотопа фосфор 30. Но изотопа фосфор 30 среди стабильных изотопов нет. У фосфора известен только один изотоп — фосфор 31. Поэтому Жолио решил, что если фосфора 30 среди известных устойчивых изотопов не существует, то это означает, что он неустойчив и должен распадаться. Следствием этого распада и является возникновение позитрона. Итак, позитроны появляются в результате радиоактивного распада неустойчивого изотопа фосфор 30*)

$$^{30}_{15}\mathrm{P}^{*}\rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si}+^{0}_{+1}e.$$

Мы пришли почти к прежнему выводу: оба превращения ядра алюминия приводят к образованию одного и того же изотопа кремния; только в одном случае превращение в изотоп кремния совершается сразу (с испусканием протонов), а в другом случае оно происходит сложным путём — сначала образуется неустойчивый изотоп фосфор 30, а затем, после испускания им позитрона, конечный устойчивый продукт кремний 30.

Аналогично обстоит дело с магнием и бором. В результате превращений этих веществ также возникают неустойчивые изотопы. Так, в случае магния превращение происходит следующим образом:

$$^{24}_{12}\mathrm{Mg}+^{4}_{2}\mathrm{He}\rightarrow ^{27}_{14}\mathrm{Si}^{*}+^{1}_{0}n.$$

*) В дальнейшем для отличия у символа радиоактивного изотопа мы будем ставить звёздочки (*).

Кремний 27 неустойчив (известны три устойчивых изотопа кремния — кремний 28, кремний 29 и кремний 30). Неустойчивый изотоп кремния постепенно распадается. При этом распаде испускаются позитроны. Формула этого превращения такова:

$$^{27}_{14}Si^* \rightarrow ^{27}_{13}Al + _{+1}^{0}e.$$

Превращение бора описывается следующей схемой:

$$^{10}_{5}B + ^{4}_{2}He \rightarrow ^{13}_{7}N^* + ^{1}_{0}n.$$

Неустойчивый изотоп азота — азот 13 — распадается, превращаясь в устойчивый изотоп углерода:

$$^{13}_{7}N^* \rightarrow ^{13}_{6}C + _{+1}^{0}e.$$

Вот какое объяснение было дано появлению позитронов у алюминия, магния и бора. Ответственными за радиоактивный позитронный распад оказались неизвестные ранее неустойчивые изотопы фосфора, кремния и азота.

Понимая всю важность сделанного открытия, Фредерик Жолио-Кюри решил непосредственными опытами подтвердить существование этих новых радиоактивных изотопов. Он решил доказать прямыми опытами, что, например, при бомбардировке алюминия альфа-частицами действительно возникает фосфор. Для этого он воспользовался тем же методом, какой применил в своё время Рамзай при исследовании химических свойств эманации радия. Опыты Жолио-Кюри были, однако, ещё более трудны, так как в его распоряжении было не более десятка тысяч атомов новых веществ. И вот с этим ничтожным количеством, весящим около 10^{-18} *г*, нужно было произвести различные химические операции. Это оказалось возможным потому, что радиоактивные вещества сами сообщают о своём присутствии; они распадаются, а распад каждого отдельного атома можно обнаружить.

Предполагая, что при облучении алюминия альфа-частицами возникает фосфор, Жолио-Кюри произвёл с алюминием, облучённым альфа-частицами, те химические операции, которые были необходимы для отделения от него фосфора. Если бы гипотеза Жолио-Кюри оказалась правильной, то там, где должен быть фосфор, оказалось бы вещество, распад которого сопровождается испусканием позитронов.

Так и случилось. Проделывая различные химические манипуляции, он убедился в том, что вещество, испускающее позитроны, по своим химическим свойствам отлично от алюминия и кремния, но совершенно тождественно фосфору. Тем самым была доказана правильность гипотезы Жолио-Кюри.

Из этих работ вытекают чрезвычайно важные выводы. Некоторые из них мы рассмотрим позже, а некоторые сформулируем сейчас:

1) Неустойчивое, радиоактивное состояние вещества может быть вызвано искусственно. В некоторых случаях оно возникает, например, в результате проникновения альфа-частиц внутрь ядра.

2) Радиоактивными могут быть не только тяжёлые элементы, находящиеся в конце периодической системы Менделеева; Жолио-Кюри показали, что и лёгкие элементы, такие, как азот, фосфор и кремний, также могут находиться в неустойчивом радиоактивном состоянии.

3) У обыкновенных устойчивых элементов — фосфора, азота, кремния — существуют радиоактивные изотопы. Возможно (мы увидим далее, что это именно так), что и другие элементы также могут иметь радиоактивные изотопы, которые не обнаруживаем только потому, что все они давно распались.

4) Ядерные превращения могут происходить несколькими путями; так, алюминий 27 под действием альфа-частиц превращается либо в кремний (один путь), либо в фосфор (другой путь).

Искусственная радиоактивность, возбуждаемая нейтронами

Открытие «искусственной радиоактивности», т. е. искусственное получение радиоактивных веществ, было выдающимся событием. Оно возбудило широкий интерес и привлекло к себе всеобщее внимание. Естественно, конечно, что, после того как Жолио-Кюри установили существование радиоактивных фосфора, кремния и азота, возник вопрос, являются ли эти искусственно полученные радиоактивные вещества особым исключением или, быть может, и другие элементы также могут быть получены в виде радиоактивных веществ. Возбуждаются ли искусственные радиоактивные

вещества действием только альфа-частиц или, быть может, и другие частицы — протоны и нейтроны — могут быть использованы для этой цели?

В середине 1934 г. итальянский физик Ферми и его сотрудники получили убедительные доказательства того, что многие устойчивые элементы могут иметь радиоактивные изотопы.

Ферми облучал различные вещества не альфа-частицами, а нейтронами. Соображения, которыми он руководствовался при этом, были таковы.

Мы хорошо знаем, что альфа-частицам трудно проникать внутрь атомных ядер. Мешают этому силы отталкивания, действующие между альфа-частицей и ядром. Именно поэтому альфа-частицы, испускаемые естественно радиоактивными веществами, могут вызывать ядерные превращения только у лёгких элементов, ядра которых обладают сравнительно небольшим зарядом. Другое дело — нейтроны. Они легко проникают внутрь атомных ядер. Можно сказать, что, попав в вещество, нейтрон раньше или позже обязательно проникнет внутрь какого-нибудь атомного ядра. Опыты, приведённые нами в главе IV, отчётливо продемонстрировали, что нейтроны весьма эффективно взаимодействуют с атомными ядрами. Они могут в одинаковой мере проникать как в лёгкие ядра, обладающие малым зарядом, так и в самые тяжёлые ядра, вызывая ядерные превращения.

Не может ли случиться так, что некоторые из этих превращений приведут к образованию искусственно радиоактивных веществ, аналогичных тем, которые были обнаружены Жолио-Кюри? Этот вопрос поставили перед собой Ферми и его сотрудники. Свыше шестидесяти различных элементов были подвергнуты ими действию нейтронов. Источником нейтронов в этих опытах служила ампулка, содержащая порошок бериллия и эманацию радия. Чтобы обнаружить, что в результате облучения нейтронами образовалось радиоактивное вещество, облучённую пластинку через некоторое время после облучения подносили к счётчику Гейгера-Мюллера.

Если бы превращение, производимое нейтронами, приводило к образованию радиоактивных веществ, то счётчик зарегистрировал бы излучение, которое они испускали в процессе распада. Так и случилось. При испытании некоторых

веществ оказалось, что ещё долгое время после облучения они продолжают испускать лучи, регистрируемые счётчиком.

Более того, оказалось, что образование радиоактивных веществ при превращениях атомных ядер происходит довольно часто. Так, из шестидесяти исследованных элементов сорок после облучения их нейтронами оказались радиоактивными. Специальными опытами (воздействием на радиоактивное излучение магнитным полем) было показано, что во всех случаях испускаются электроны, хотя и не была полностью исключена возможность того, что некоторые из исследованных элементов испускали при радиоактивном распаде позитроны. Почти во всех случаях, где имело место образование радиоактивных веществ, был измерен период полураспада. Он оказался меняющимся в широких пределах — от нескольких секунд до многих дней у разных веществ. Очень длинные периоды полураспада в первых работах Ферми не были обнаружены. Повидимому, это было связано с тем, что интенсивность радиоактивного излучения у таких веществ невелика.

Для определения характера ядерного превращения, происходящего в результате захвата нейтронов, Ферми пользовался химическим анализом, аналогичным тому, какой применял Фредерик Жолио-Кюри при установлении природы радиофосфора. Исходя из того, что образующийся радиоактивный элемент является в таблице Менделеева близким соседом облучённого элемента и, следовательно, имеет близкий к нему атомный номер, он определял природу носителя радиоактивности, отождествляя его с одним из элементов, соседних с облучённым.

Для этого к облучённому элементу по очереди прибавлялся один из его соседей и затем оба элемента химическим путём отделялись друг от друга. После разделения, при помощи счётчика Гейгера-Мюллера устанавливалось, с каким элементом отделялось радиоактивное вещество. Рядом последовательных операций всегда удавалось установить, что радиоактивное вещество следует за каким-то определённым элементом. Тем самым определялась и природа радиоактивного вещества. Из работы Ферми могут быть сделаны следующие выводы:

1) Нейтроны действительно проникают в ядра значительного числа элементов. При этом не наблюдается никакого

различия между лёгкими и тяжёлыми ядрами. Как те, так и другие способны образовывать радиоактивные вещества.

2) Радиоактивный изотоп может быть образован несколькими способами. Возможно, например, образование радиоактивного изотопа путём захвата нейтрона ядром с последующим выбрасыванием альфа-частицы. Таким образом из алюминия образуется радиоактивный натрий

$${}^{27}_{13}Al + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{24}_{11}Na^* + {}^{4}_{2}He;$$

возможно образование радиоактивного вещества из ядра, захватившего нейтрон, и в том случае, если превращение сопровождается выбрасыванием протона. Так происходит, например, образование радиоактивного кремния из фосфора:

$${}^{31}_{15}P + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{31}_{14}Si^* + {}^{1}_{1}H;$$

наконец, возможно образование радиоактивных веществ и в том случае, когда из ядра, захватившего нейтрон, не вылетает никакая частица. Вот пример такого превращения:

$${}^{127}_{53}J + {}^{1}_{0}n = {}^{128}_{53}J^*.$$

Последний случай образования радиоактивных изотопов особенно замечателен. Это — первый случай среди многих известных ядерных превращений, при котором осуществляется простой захват частицы; поэтому здесь особенно важна надёжность доказательств, приводимых для подтверждения этой схемы. Ферми сделал своё заключение о таком характере превращения у иода по методу исключения на основании химических данных, показывающих, что радиоактивный изотоп не может быть ни сурьмой (выбрасывание альфа-частиц), ни теллуром (вылет протона). Таким же методом был установлен характер превращений у меди, ванадия, марганца, мышьяка, брома, серебра, иридия и золота. В этом случае образование радиоактивных веществ происходит также путём захвата нейтрона ядром, *не сопровождающегося вылетом другой частицы* (протона, альфа-частицы).

Очень часто превращение ядра, захватившего нейтрон, совершается несколькими способами.

Так, например, ядра алюминия, захватившие нейтрон, превращаются частью с испусканием альфа-частиц:

$${}^{27}_{13}Al + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{24}_{11}Na^* + {}^{4}_{2}He;$$

частью с испусканием протонов:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}+^{1}_{0}n \longrightarrow ^{27}_{12}\mathrm{Mg}^{*}+^{1}_{1}\mathrm{H};$$

частично осуществляется и прямой захват нейтрона ядром:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}+^{1}_{0}n \longrightarrow ^{28}_{13}\mathrm{Al}^{*}.$$

В некоторых случаях зарегистрировано образование радиоактивного изотопа всеми тремя возможными способами превращения, именно:

$$^{27}_{13}\mathrm{Al}+^{1}_{0}n \longrightarrow ^{24}_{11}\mathrm{Na}^{*}+^{4}_{2}\mathrm{He},$$
$$^{24}_{12}\mathrm{Mg}+^{1}_{0}n \longrightarrow ^{24}_{11}\mathrm{Na}^{*}+^{1}_{1}\mathrm{H},$$
$$^{23}_{11}\mathrm{Na}+^{1}_{0}n \longrightarrow ^{24}_{11}\mathrm{Na}^{*},$$
$$^{59}_{27}\mathrm{Co}+^{1}_{0}n \longrightarrow ^{56}_{25}\mathrm{Mn}^{*}+^{4}_{2}\mathrm{He},$$
$$^{56}_{26}\mathrm{Fe}+^{1}_{0}n \longrightarrow ^{56}_{25}\mathrm{Mn}^{*}+^{1}_{1}\mathrm{H},$$
$$^{55}_{25}\mathrm{Mn}+^{1}_{0}n \longrightarrow ^{56}_{25}\mathrm{Mn}^{*}.$$

3) Имеется существенное различие в характере превращений, наблюдаемых у тяжёлых и у лёгких элементов. Радиоактивные изотопы у лёгких элементов образуются обычно с испусканием либо альфа-частицы, либо протона. У тяжёлых же элементов радиоактивные изотопы образуются в основном путём прямого захвата нейтрона. Это обстоятельство не является случайным. Оно свидетельствует о том, что заряженным частицам — протонам и альфа-частицам — не только трудно проникнуть внутрь атомного ядра, но также трудно и выбраться оттуда. Чем больше заряд ядра, тем бо́льшую энергию должны иметь альфа-частицы и протоны, чтобы покинуть ядро. По этой причине Ферми не мог наблюдать образование радиоактивных веществ, обусловленное вылетом альфа-частиц или протонов, у тяжёлых ядер. Чем меньше энергия нейтронов, применяемых при бомбардировке ядер, тем легче те элементы, у которых эти нейтроны могут возбудить искусственную радиоактивность путём вылета альфа-частицы или протона. Наоборот, если применить при бомбардировке нейтроны очень большой энергии (такие опыты были произведены впоследствии), то и у тяжёлых элементов наблюдается искусственная радиоактивность, образующаяся в результате вылета из ядра, захватившего нейтрон, альфа-частицы или протона.

Совсем иначе обстоит дело с теми радиоактивными веществами, которые образуются прямым захватом нейтрона. Для проникновения внутрь ядра нейтронам не надо иметь сколько-нибудь значительной энергии, ибо, приближаясь к ядру, они не должны преодолевать действия электрических сил отталкивания. Поэтому можно было предположить, что даже самые медленные нейтроны могут возбудить радиоактивность — образовать радиоактивный изотоп, проникая в ядро.

Для того чтобы проверить эту мысль, Ферми произвёл новые опыты, которые привели к интереснейшим результатам.

Тепловые нейтроны

Прежде всего мы поясним, как были получены нейтроны малых энергий. Для получения нейтронов Ферми пользовался наиболее распространённым тогда способом получения нейтронов из бериллия путём облучения его альфа-частицами. Получающиеся при этом нейтроны имеют громадную энергию, измеряемую миллионами электрон-вольт.

Как же можно было уменьшить энергию нейтронов?

Ферми поступил так. Известно, что не при всяком столкновении нейтрон захватывается ядром. Когда мы говорим, что нейтрон легко проникает внутрь атомного ядра, то мы лишь сравниваем нейтрон с альфа-частицей или протоном. В действительности же нейтрон захватывается ядрами далеко не при каждом столкновении. Обычно до того, как нейтрон захватится каким-либо ядром, он испытает несколько столкновений с другими ядрами.

Что же происходит при таком столкновении нейтрона с ядром, которое не сопровождается захватом нейтрона? Об этом мы уже писали ранее, в главе IV. При таком столкновении нейтрон передаёт часть своей кинетической энергии тому ядру, с которым он столкнулся. Энергия нейтрона становится меньше. После ряда таких столкновений энергия нейтрона может уменьшиться на значительную величину. Особенно велико будет уменьшение энергии нейтрона при столкновениях с ядрами атомов водорода. При подходящих условиях столкновения нейтрон может передать ядру водорода всю свою кинетическую энергию. Однако такие случаи редки, в большинстве случаев при столкновении нейт-

рон теряет меньшую энергию. Точные расчёты показывают, что *в среднем* у нейтрона после столкновения остаётся около одной трети первоначальной энергии E $\left(\text{точнее, } \frac{1}{2,718} E\right)$. Если нейтроны испытают по два столкновения с протонами, то после двух столкновений средняя энергия нейтронов окажется равной $\left(\frac{1}{2,718}\right)^2 E$. После десятого столкновения сред-

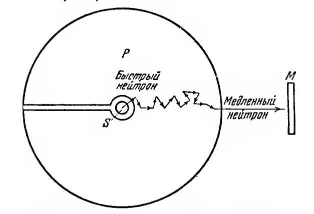


Рис. 38. Схема опыта по замедлению нейтрона.
S — источник нейтрона (ампулка с бериллием и эманацией радия); P — парафин; M — исследуемое вещество.

няя энергия нейтронов окажется равной приблизительно одной двадцатитысячной от первоначального значения энергии.

Этой особенностью столкновения нейтронов с протонами и воспользовался Ферми, чтобы получить нейтроны малой энергии и наблюдать их действие на атомные ядра различных элементов. С этой целью он окружал источник нейтронов слоем парафина или воды толщиной в несколько сантиметров, а снаружи помещал исследуемое вещество (рис. 38). Толщина слоя парафина P выбиралась такой, чтобы нейтрон, прежде чем он достигнет исследуемого вещества M, испытал несколько десятков столкновений с ядрами водорода. Энергия нейтрона в результате такого количества столкновений падала столь значительно, что вместо начальной величины в несколько миллионов электрон-вольт она становилась

сравнимой с энергией, которую получают атомы различных веществ вследствие теплового движения (малые доли электрон-вольта).

В дальнейшем такие замедленные нейтроны стали называть *тепловыми нейтронами*. Этим названием стремились подчеркнуть то, что энергия таких нейтронов соответствует энергии теплового движения.

Когда Ферми стал проверять, способны ли тепловые нейтроны возбуждать радиоактивность, то он сразу обнаружил, что те радиоактивные изотопы, которые образуются в результате выбрасывания из ядра альфа-частицы или протона, тепловыми нейтронами не создаются. Такой радиоактивности он не мог обнаружить никакими способами. Однако превращения, в процессе которых происходит только захват нейтронов, возбуждались и тепловыми нейтронами. Более того, тепловые нейтроны осуществляют такие превращения с гораздо большей эффективностью, чем нейтроны с большой кинетической энергией. Особенно эффективным оказалось действие тепловых нейтронов на некоторые вещества, в частности индий, родий, серебро. Эффективность возбуждения радиоактивности у этих веществ тепловыми нейтронами была столь значительна, что эти вещества стали применять в качестве индикаторов, указывающих на присутствие тепловых нейтронов.

Для характеристики большой вероятности захвата тепловых нейтронов ядрами родия мы можем привести следующее сравнение: количество быстрых нейтронов уменьшается наполовину при прохождении приблизительно 10 *см* свинца, в то время как половина тепловых нейтронов захватывается пластинкой родия толщиной всего лишь в $^1/_4$ *мм*. Произведённое сравнение показывает, что тепловые нейтроны захватываются ядрами некоторых элементов весьма эффективно. Это обстоятельство сыграло выдающуюся роль в развитии ядерной физики и имеет огромное значение для практического использования ядерной энергии.

Захват нейтронов, не приводящий к радиоактивности

Нейтрон, попав в ядро, изменяет его свойства. Даже если из бомбардируемого ядра не вылетит никакой частицы и заряд ядра не изменится, всё-таки получится иное ядро.

Мы уже знаем, что ядра, захватившие нейтрон, становятся радиоактивными. Но всегда ли так происходит? Не могут ли нейтроны, в частности тепловые, захватываться ядром без образования радиоактивного изотопа?

Ферми разрешил и этот вопрос. Он воспользовался тем, что тепловые нейтроны эффективно действуют на родий, сообщая ему радиоактивные свойства. Наблюдая появление

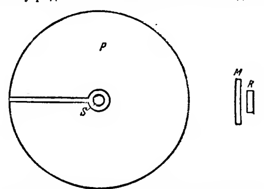


Рис. 39. Измерение поглощения медленных нейтронов, не приводящего к созданию радиоактивного изотопа.

S — источник нейтронов; P — парафин; M — исследуемое вещество; R — детектор из родия.

радиоактивности у родия, можно обнаруживать весьма слабые потоки нейтронов. Поэтому Ферми и избрал в качестве индикатора тепловых нейтронов пластинки из родия. Между родиевой пластинкой R и источником нейтронов S он поместил парафиновый блок P для замедления нейтронов, а между парафином и родиевой пластинкой стал помещать пластинки M из различных веществ (рис. 39).

Ферми рассуждал так: если какое-нибудь вещество сильно поглощает тепловые нейтроны, то пластинка из такого вещества, помещённая между источником тепловых нейтронов и родиевой пластинкой, уменьшит поток тепловых нейтронов, попадающих на родиевую пластинку. Если при этом мы не обнаружим в пластинке, поглотившей тепловые нейтроны, образования радиоактивных веществ, то это будет означать, что в результате захвата ядром нейтрона образует-

Таблица VI

Некоторые радиоактивные изотопы и их характеристики

Элемент	Символ радиоактивного изотопа	Период полураспада	Энергия излучения в миллионах электрон-вольт	
			бета-лучи	гамма-лучи
Углерод . .	$^{14}_{6}C$	5720 лет	0,155	
Натрий. . .	$^{24}_{11}Na$	15 часов	1,4	1,4; 2,8
Фосфор . .	$^{32}_{15}P$	14,3 дня	1,69	
Сера	$^{35}_{16}S$	87,1 »	0,17	
Хлор . . .	$^{36}_{17}Cl$	$0{,}4 \cdot 10^6$ лет	0,71	
Аргон . . .	$^{37}_{18}Ar$	34,1 дня	*K**)	
Кальций . .	$^{45}_{20}Ca$	152 »	0,26	
Скандий . .	$^{46}_{21}Sc$	85 дней	0,36	0,9: 1,12
Титан . . .	$^{51}_{22}Ti$	72 дня	0,45	1,0
Хром . . .	$^{51}_{24}Cr$	26,5 »	*K*	0,28; 0,32
Железо . .	$^{55}_{26}Fe$	4 года	*K*	
	$^{59}_{26}Fe$	45,5 дня	0,46	1,1; 1,3
Кобальт . .	$^{60}_{27}Co$	5,3 года	0,3	1,17; 1,33
Цинк . . .	$^{65}_{30}Zn$	250 дней	*K*	1,11
Стронций .	$^{89}_{38}Sr$	54,5 дня	1,46	
Цирконий .	$^{95}_{40}Zr$	65 дней	0,394; 1,0	0,23; 0,73
Технеций . .	$^{99}_{43}Tc$	$4{,}7 \cdot 10^5$ лет	0,3	
Серебро . .	$^{110}_{47}Ag$	282 дня	0,08; 0,53; 2,79	0,11; 0,66; 0,9; 1,4
	$^{111}_{47}Ag$	7,5 »	1,0	
Кадмий . .	$^{109}_{48}Cd$	330 дней	K	
	$^{115}_{48}Cd$	43 дня	1,85	0,5
Сурьма . . .	$^{125}_{51}Sb$	2,7 года	0,3; 0,6	
Иод	$^{131}_{53}J$	8 дней	0,25, 0,60	0,08; 0,36; 0,63

*) *K* означает наличие *K*-захвата, т. е. захвата ядром электрона из *K*-оболочки атома (этот процесс будет подробно рассмотрен ниже).

Продолжение

Элемент	Символ радиоактивного изотопа	Период полураспада	Энергия излучения в миллионах электрон-вольт	
			бета-лучи	гамма-лучи
Европий . .	$^{155}_{63}Eu$	1,7 года	0,18; 0,23	0,084
Гафний . . .	$^{181}_{72}Hf$	46 дней	0,4	0,13; 0,33; 0,47
Тантал. . .	$^{182}_{73}Ta$	117 »	0,53	1,13; 1,22 и т. д.
Вольфрам .	$^{185}_{74}W$	73,2 дня	0,43	
Золото . . .	$^{198}_{79}Au$	2,7 »	0,60; 0,96	0,41
	$^{199}_{79}Au$	3,3 »	0,32; 1,01	0,45
Ртуть . . .	$^{205}_{80}Hg$	5,5 минуты	1,62	
Таллий . . .	$^{204}_{81}Tl$	2,7 года	0,78	

ся не радиоактивный, а устойчивый изотоп исследуемого элемента.

Исследуя по указанному выше способу поглощение тепловых нейтронов, он обнаружил, что некоторые вещества, например бор, кадмий, иттрий, иридий и др., поглощают тепловые нейтроны ещё сильнее, чем родий. Например, слой бора толщиной в $^1/_{10}$ *мм* почти полностью поглощает тепловые нейтроны, хотя при этом и не образуется какое-либо радиоактивное вещество. Так как бор имеет всего лишь два изотопа, то легко было решить, какой из них после захвата нейтрона остаётся устойчивым изотопом. Очевидно, что это должен быть более лёгкий изотоп бора — бор 10. Бор 10, захватив нейтрон, превращается в другой устойчивый изотоп бора — бор 11:

$$^{10}_{5}B+^{1}_{0}n \rightarrow ^{11}_{5}B.$$

Благодаря способности бора, и особенно кадмия, сильно поглощать тепловые нейтроны эти вещества стали в дальнейшем широко применять в качестве экранов и фильтров для тепловых нейтронов.

При получении радиоактивных веществ учёные не ограничились применением альфа-частиц и нейтронов. Вскоре стали изучать действие искусственно ускоренных протонов и дейтронов. Действие пучка быстрых дейтронов оказалось особенно эффективным. В результате было обнаружено много новых радиоактивных веществ. Очень скоро выяснилось, что новых, искусственно полученных радиоактивных изотопов гораздо больше, чем обыкновенных устойчивых изотопов. Полученные искусственные радиоактивные вещества начали находить себе практическое применение. С их помощью была создана так называемая методика меченых атомов. В таблице VI указаны характеристики некоторых наиболее важных радиоактивных изотопов.

Замечательным оказалось то, что при помощи нейтронов, дейтронов или протонов можно получить радиоактивные изотопы любого элемента. Это обстоятельство имеет большое значение при практическом использовании радиоактивных изотопов.

Изомерия атомных ядер

Изучение взаимодействия нейтронов с ядрами привело к установлению ещё одного удивительного и важного свойства атомных ядер. Честь этого открытия принадлежит советскому физику И. В. Курчатову и его ученикам. Для того чтобы уяснить суть дела, представим себе, что мы подвергли бром действию медленных нейтронов. Что можно ожидать в этом случае?

Хорошо известно, что элемент бром состоит из двух изотопов — бром 79 и бром 81. Поскольку медленные нейтроны способны проникать в атомные ядра и, застревая там, образовывать новые радиоактивные ядра, можно ожидать появления одного или двух радиоактивных изотопов брома согласно следующей схеме превращений:

$$^{79}_{35}\mathrm{Br}+^{1}_{0}n \rightarrow ^{80}_{35}\mathrm{Br}^*,$$
$$^{81}_{35}\mathrm{Br}+^{1}_{0}n \rightarrow ^{82}_{35}\mathrm{Br}^*,$$

т. е. в результате бомбардировки брома нейтронами можно было ожидать появления либо одного из двух новых радиоактивных веществ ($^{80}_{35}\mathrm{Br}$ или $^{82}_{35}\mathrm{Br}$), либо обоих вместе, при-

чём каждое из них, как и всякое радиоактивное вещество, имело бы свой период полураспада. Могло, конечно, случиться, что ядра $^{80}_{35}Br$ и $^{82}_{35}Br$ оказались бы нерадиоактивными; в этом случае появление радиоактивных веществ не должно было бы наблюдаться. Однако Курчатов и его сотрудники нашли, что при облучении брома нейтронами образуются радиоактивные вещества с тремя периодами полураспада — 18 минут, 4,4 часа и 34 часа. Это значит, что в результате бомбардировки брома нейтронами возникают три новых радиоактивных изотопа. Рядом контрольных опытов было показано, что все три периода полураспада связаны с бромом, более того, носители обнаруженной радиоактивности являются изотопами брома, следовательно, они возникают в результате захвата нейтронов ядрами брома.

Почему же наблюдается три новых радиоактивных изотопа, когда исходных изотопов всего два? Курчатов нашёл правильное объяснение наблюдённым фактам. Он указал, что в действительности образуются только два радиоактивных изотопа, а третий период полураспада соответствует распаду ядер одного из них, находящихся в *изомерном состоянии*. Напомним читателю, что мы называем изомерами *вещества*, ядра *которых имеют один и тот же заряд* (*атомный номер*) *и одинаковое массовое число, но разные энергии, вследствие чего периоды их полураспада оказываются различными*. Образование изомерных состояний ядра и установил Курчатов. Более детальные исследования показали, что период 34 часа соответствует распаду радиоактивного изотопа бром 82, период полураспада 18 минут соответствует распаду радиоактивного изотопа бром 80, а период полураспада 4,4 часа соответствует распаду ядер, являющихся изомерами брома 80.

Было установлено, что ядро радиоактивного изомера брома 80 имеет избыток энергии, равной всего тридцати тысячам электрон-вольт. Потеряв этот избыток энергии (обычно его забирает один из электронов, входящих в электронную оболочку атома брома), изомер брома 80 превращается в нормальный радиоактивный изотоп брома.

Процесс превращения изомера брома 80 в нормальный бром 80 происходит не сразу, а так же, как и в обычном радиоактивном распаде, с некоторой вероятностью. Эта

вероятность такова, что за 4,4 часа половина всех изомерных ядер превращается в ядра нормального изотопа, который, как мы указали выше, является радиоактивным изотопом с периодом полураспада 18 минут.

Бром 80 оказался не единственным веществом, имеющим изомеры. Дальнейшие исследования обнаружили большое количество таких веществ.

Новые химические элементы

Ядерные превращения, происходящие при бомбардировке различных элементов быстрыми частицами, позволили обнаружить много новых радиоактивных изотопов. Число этих изотопов растёт буквально с каждым днём и, как уже указывалось, намного превосходит число стабильных изотопов.

Замечательным оказалось то, что среди новых радиоактивных веществ были найдены изотопы ранее неизвестных элементов.

Таблица Менделеева, как известно, содержит 92 элемента. Однако не все эти элементы были обнаружены в действительности; долгое время оставались неизвестными элементы, отмеченные в таблице Менделеева номерами 43, 61, 85 и 87. Правда, время от времени появлялись сообщения об открытии этих элементов и о присвоении им определённых названий и химических символов. Однако эти сообщения оказывались неверными.

Представителей этих элементов среди устойчивых изотопов не найдено и в настоящее время. Лишь в результате ядерных превращений удалось получить изотопы элементов № 43, 61, 85 и 87 и установить их химические свойства. Более того, мы знаем уже много изотопов, принадлежащих этим элементам.

Элемент № 43. Изотопы этого элемента впервые были получены в результате бомбардировки молибдена дейтронами, ускоренными с помощью циклотрона. Чтобы подчеркнуть, что этот элемент впервые был получен с помощью применения ядерной техники, ему присвоено название «технеций» и химический символ Tc. Теперь мы уже знаем более десяти изотопов технеция (с массовыми числами 92, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 105). У четырёх изотопов технеция—

94, 95, 97 и 99 — обнаружены изомерные состояния. Наиболее устойчивым изотопом технеция является изотоп технеция 99. Он бета-активен, и период его полураспада равен $4{,}7 \cdot 10^5$ лет. Этот изотоп (как наиболее устойчивый) мы считаем в настоящее время представителем элемента технеция. Поэтому в таблице Менделеева атомный вес технеция и обозначен числом 99.

Элемент № 61. Его назвали «прометий», химический символ Pm. В настоящее время известно восемь изотопов этого элемента. Лишь у пяти из них установлена величина массового числа (143, 147, 148, 149 и 151). Наиболее устойчивый изотоп имеет массовое число 147. Период его полураспада — 3,7 года.

Элемент № 85. Название этого элемента «астатин», химический символ At. Мы знаем уже десять изотопов этого элемента. Массовые числа этих изотопов следующие: 207, 208, 210, 211, 212, 214, 215, 216, 227, 218. Бóльшая часть этих изотопов весьма недолговечна, период их полураспада составляет малые доли секунды, а период полураспада астатина 214 так мал, что его не удалось измерить. Даже наиболее устойчивый из всех известных изотопов астатина — астатин 210 — живёт недолго. Период его полураспада равен всего лишь 8,3 часа. Он был получен при бомбардировке висмута альфа-частицами с энергией 29 миллионов электрон-вольт. Реакция его образования следующая:

$$^{209}_{83}\mathrm{Bi} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \longrightarrow ^{210}_{85}\mathrm{At} + 3 \text{ нейтрона.}$$

Как наиболее устойчивый изотоп астатин 210 является представителем элемента № 85.

Элемент № 87. Этот элемент носит название «франций», химический символ Fr. Известно всего 5 изотопов франция. Массовые числа этих изотопов таковы: 218, 219, 220, 221 и 223. В таблице радиоактивного семейства актиния (таблица III) изотоп франция 223 помещён под названием «актиний K». Он получается в результате альфа-распада актиния 227. Все изотопы франция короткоживущие. Наиболее устойчивым является изотоп с массовым числом 223. Однако время жизни этого наиболее устойчивого изотопа невелико. Период полураспада его равен 21 минуте. При распаде он излучает гамма- и бета-лучи.

Открытие элементов № 43, 61, 85 и 87 заполнило пустые места в таблице Менделеева. Однако изучение ядерных превращений дало нам значительно больше. Удалось не только заполнить таблицу Менделеева, но и продолжить её далее. Мы знаем теперь элементы № 93 (нептуний), 94 (плутоний), 95 (америций), 96 (кюрий), 97 (берклий), 98 (калифорний), 99 (эйнштейний), 100 (фермий) и 101, названный в честь выдающегося русского учёного Д. И. Менделеева менделевием. Об этих элементах, их открытии и свойствах мы расскажем ниже.

ГЛАВА VIII

МЕЗОНЫ

В этой главе мы снова вернёмся к свойствам космических лучей. Ранее уже упоминалось, что состав космического излучения сложен и что принято разбивать космические лучи на две компоненты—мягкую и жёсткую. Мягкая компонента космических лучей поглощается веществом сравнительно сильно: 5—10 *см* свинца целиком поглощают всю мягкую компоненту. Напротив, жёсткая компонента поглощается веществом очень мало. Заметная часть этого излучения проходит через слои свинца толщиной в метр и более.

Чем же вызвано различие в поглощении обеих компонент? Различие в поглощении компонент космического излучения могло быть следствием различия их природы. Естественно, что различные лучи по разному и поглощаются. Более того, по характеру поглощения в ряде случаев можно судить и о природе самих лучей.

Вспомним, что сложный характер беккерелевского излучения был раскрыт благодаря различному характеру поглощения альфа-, бета- и гамма-лучей, входящих в состав этого излучения.

Однако после опытов Боте, Колхёрстера и Скобельцына считалось, что космические лучи являются потоком электронов и что природа обеих компонент одинакова. Правда, открытие Андерсона внесло поправку в эти представления. Оказалось, что в составе космического излучения, регистрируемого у поверхности Земли, имеются также и позитроны.

Поскольку считалось, что жёсткая и мягкая компоненты космического излучения имеют одинаковую природу, различное поглощение их в веществе приходилось объяснять различием их энергий. Для объяснения способности космиче-

ческих электронов проходить через большие толщи вещества предполагали, что эти электроны (и позитроны) обладают громадной кинетической энергией. Мягкая компонента космического излучения — это поток электронов и позитронов, кинетическая энергия которых достигает величины порядка 100 миллионов электрон-вольт, а жёсткая компонента — это электроны и позитроны с энергией более 1 миллиарда электрон-вольт. Впрочем, следует оговориться, что знак заряда частиц, составляющих жёсткую компоненту, был установлен не во всех случаях, ибо эти частицы весьма слабо отклоняются магнитным полем.

Ионизационные и радиационные потери

Исследование движения частиц, обладающих большой энергией (в частности, электронов и гамма-квантов), и взаимодействия их с различными веществами показало, однако, что в таком представлении о космических лучах имеется серьёзное противоречие.

Чтобы разобраться в сущности этого противоречия, напомним о тех явлениях, которыми сопровождается движение электронов и гамма-квантов в различных веществах.

Уже давно было известно, что движение любой частицы в каком-либо веществе сопровождается потерей её энергии. Например, электрон, движущийся в воздухе, постепенно теряет свою энергию. Тщательное изучение этих потерь показало, что есть две причины, вследствие которых электроны теряют свою энергию.

Первая из них заключается в том, что электрон большой энергии, проходя сквозь встречные атомы, взаимодействует с их электронными оболочками. Электроны атома, встретившегося на пути быстро летящего электрона, испытают с его стороны сильный толчок. Иногда он бывает столь сильным, что один из электронов отрывается от атома. Атом оказывается ионизированным, а первичный электрон теряет при этом часть своей энергии. Двигаясь от атома к атому, он постепенно растрачивает свою энергию на ионизацию встречных атомов. Такого рода потери энергии электроном условились называть ионизационными потерями.

Отметим некоторые особенности, относящиеся к величине ионизационных потерь. Условия столкновения рассматри-

ваемого электрона с электронами, принадлежащими к оболочке встречных атомов, могут весьма различаться. Может произойти так называемый «лобовой удар», когда ударяющая частица летит по прямой, соединяющей центры обеих взаимодействующих частиц; может случиться «косой удар», когда направление летящей частицы образует некоторый угол с прямой, соединяющей центры обеих частиц. Величина передаваемой энергии при различных столкновениях различна. Поскольку первичный электрон испытывает на своём пути громадное число столкновений, осуществляются в действительности самые разнообразные случаи. В соответствии с этим и энергия, теряемая электроном, будет различна в различных столкновениях. Однако большей частью энергия, получаемая электроном атомной оболочки, будет порядка энергии ионизации, т. е. 20—30 электрон-вольт. Естественно, конечно, что потеря столь малой энергии не отразится на движении быстрого электрона, обладающего энергией во много миллионов электрон-вольт. Направление его движения не будет изменяться; оно будет прямолинейным.

Возможно также небольшое число таких случаев, когда первичный электрон (так мы будем называть быстрый электрон) передаёт встречному электрону энергию, значительно превосходящую величину, необходимую для отрыва его от атома. В этом случае вырванный из атома вторичный электрон сам будет обладать значительной кинетической энергией. Он окажется в состоянии пройти заметный путь в воздухе (или в другой среде) и на своём пути также будет производить ионизацию встречных атомов. Эти вторичные электроны принято называть *«дельта-лучами»*. Число дельта-лучей, образуемых на пути первичного электрона, сравнительно невелико. Поэтому общая потеря энергии, приходящаяся на дельта-лучи, оказывается небольшой.

Основные потери энергии приходятся на большое число ионизаций, в которых электрон, вырванный из атома, получает сравнительно небольшую энергию. Таких столкновений электрон большой энергии испытывает очень много, прежде чем он растратит свою энергию. Так как электрон испытывает много столкновений, то среди них окажутся представленными различные типы столкновений. Поэтому, хотя каждое отдельное столкновение и имеет индивидуаль-

ный характер, в среднем электроны, испытывающие большое число столкновений, теряют в результате ионизации приблизительно одинаковое количество энергии. Энергия, теряемая быстро движущимся электроном на каком-нибудь участке его пути, зависит, конечно, от его скорости, но, кроме этого, также и от свойств среды, в частности от её плотности (количества атомов на пути движущегося электрона). Принято характеризовать величину потерь количеством энергии, которое теряет электрон при прохождении слоя такой толщины, что в нём на каждый квадратный сантиметр поверхности приходится 1 *г* вещества. В дальнейшем под термином *потеря энергии* мы будем подразумевать энергию, теряемую при прохождении слоя вещества толщиной 1 $г/см^2$.

Ионизационные потери, как мы указали, зависят от скорости электрона. Электрон, движущийся медленно, взаимодействует с атомом (или с отдельным электроном в атоме) более долгое время, а потому сообщает ему бо́льший импульс, чем быстрый электрон. Поэтому медленные электроны теряют свою энергию быстрее, чем электроны, обладающие большой кинетической энергией. Иными словами, с увеличением энергии электронов их ионизационные потери уменьшаются.

Однако при очень больших энергиях (порядка нескольких миллионов, электрон-вольт) ионизационные потери электронов вновь начинают возрастать, хотя и медленно. Минимумом потерь обладают электроны, скорость которых равна 96% скорости света.

Аналогичная картина ионизационных потерь имеет место и для позитронов.

Ионизационные потери, возникающие в результате взаимодействия частицы с электронной оболочкой атома, являются только одним из видов потерь энергии у быстрых электронов. Известно, что наряду с ионизационными потерями существуют и так называемые радиационные потери.

Сущность радиационных потерь заключается в следующем: когда электрон пролетает близко от ядра, то происходит взаимодействие между ним и ядром. Это взаимодействие гораздо более сильное, чем взаимодействие электрона с каким-либо из электронов оболочки, ибо заряд ядра значительно больше заряда электрона. Вследствие большой массы

ядра и сильного взаимодействия пролетающий электрон испытывает резкое торможение. При таком торможении электрон теряет значительную часть своей энергии. Эта энергия выделяется в виде кванта электромагнитного излучения. Чем больше энергия электрона, тем бо́льшую часть её теряет он при торможении и тем большей оказывается энергия кванта, который испускается электроном.

Однако вероятность испускания кванта не очень велика, ибо квант испускается в том случае, когда электрон проходит достаточно близко от ядра, а ядро, как мы уже знаем, занимает очень малую часть объёма всего атома. Кванты испускаются столь редко, что хотя в этом процессе, когда он происходит, электрон теряет значительную часть энергии, всё же в среднем потери энергии на излучение — радиационные потери — при не очень больших энергиях электрона оказываются малыми по сравнению с ионизационными потерями. На основе этих данных, экспериментально проверенных для электронов сравнительно небольших энергий, делалось заключение, что в основном потери энергии электронов — это ионизационные потери, а раз ионизационные потери уменьшаются с увеличением энергии электрона, то, следовательно, с увеличением энергии будет увеличиваться пробег электронов — путь, который проходит электрон до полной остановки (точнее до тех пор, пока энергия электрона станет столь малой, что он уже не сможет ионизировать встречные атомы). Если бы потери энергии электронов не зависели от их скорости, то пробег электронов должен был бы увеличиваться во столько раз, во сколько увеличилась их энергия. В действительности же пробег электронов с увеличением их энергии изменяется более сложным образом. Сначала с увеличением энергии пробег увеличивается очень быстро, так как действуют сразу две причины и *увеличение* энергии электрона и *уменьшение* потерь (энергия, теряемая на единицу пути). В дальнейшем, однако, когда энергия электрона достигнет величины в несколько миллионов электрон-вольт, возрастание длины пробега с увеличением энергии электрона замедлится. В этом случае ионизационные потери начинают немного увеличиваться с увеличением энергии. Так как это возрастание ионизационных потерь незначительно, то величина пробега электрона даже при очень больших энергиях должна всё же заметно (почти ли-

нейно) возрастать по мере увеличения его энергии. Если рассчитать (на основании известных значений потери энергии), какой должна быть энергия электрона, чтобы, проходя через слой свинца толщиной около 1 *м*, он не растратил бы её полностью вследствие ионизации, то оказывается, что она должна быть порядка нескольких миллиардов электрон-вольт.

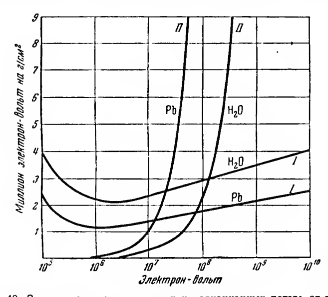


Рис. 40. Зависимость ионизационных и радиационных потерь от энергии электронов. Кривые *I* представляют ионизационные потери в свинце и воде. Кривые *II* представляют радиационные потери в тех же веществах. В воде радиационные потери начинают превосходить ионизационные при энергии электрона порядка 100 миллионов электрон-вольт, а в свинце — при энергии порядка 10 миллионов электрон-вольт.

Именно на этом основании и было выдвинуто предположение, что те частицы, находящиеся в составе космического излучения, которые могут проходить через значительные толщи вещества (жёсткая компонента), и представляют собой электроны с громадной энергией, измеряемой миллиардами электрон-вольт.

Чтобы дать читателю более точное представление о ионизационных потерях энергии, на рис. 40 мы приводим кривые *I*, представляющие зависимость ионизационных потерь в воде и в свинце от энергии электрона.

Однако Бете и Гайтлер, тщательно исследовавшие теоретически вопрос о радиационных потерях, показали, что эти потери растут с увеличением энергии электрона значительно быстрее, чем ионизационные потери, и при достаточно больших энергиях электрона становятся не только сравнимыми с ионизационными потерями, но даже значительно превосходят их, так что у электронов такой энергии радиационные потери являются основным видом потерь.

Соотношение между ионизационными и радиационными потерями оказывается различным для различных веществ. Чем больше заряд ядра, тем бо́льшую роль играют радиационные потери. На рис. 40 приведены также и кривые *II*, выражающие согласно расчётам Бете и Гайтлера зависимость радиационных потерь электронов в воде и в свинце от энергии.

Вычисления Бете и Гайтлера показывают, например, что электроны с энергией, большей 100 миллионов электрон-вольт, теряют свою энергию в основном на излучение, а не на ионизацию, причём возрастание радиационных потерь с увеличением энергии электрона столь велико, что пробег электрона в воздухе не может быть значительно больше 300 *м*, ибо на этом пути электрон, какой бы большой энергией он ни обладал, в значительной мере растеряет её на излучение. Чем больше энергия электрона, тем быстрее он её теряет, испуская кванты больших энергий.

Выводы теории Бете и Гайтлера были подтверждены экспериментально работами многих учёных, в том числе советских учёных — Алиханова и Алиханяна, Арцимовича, Синельникова, Корсунского и Вальтера.

Подтверждение выводов теории Бете и Гайтлера имело чрезвычайно важные последствия для развития наших знаний о космических лучах. Оно привлекло внимание учёных к вопросу о природе жёсткой компоненты космического излучения.

Согласно этой теории электроны и позитроны, какой бы значительной энергией они ни обладали, не в состоянии пройти слой свинца толщиной в один метр. Допустим, что

электроны и позитроны с энергией в несколько миллиардов или даже десятков миллиардов электрон-вольт действительно присутствуют в составе космического излучения. Посмотрим, какова будет судьба этих электронов.

Пусть электрон движется в воздухе. Тогда согласно Бете и Гайтлеру он не пройдёт и 300 *м*, как потеряет свою энергию, излучив её в виде гамма-кванта. Мы несколько упростим действительное положение вещей, если примем, что энергия образующегося кванта будет равна всей первоначальной энергии электрона. Направление движения кванта практически будет совпадать с первоначальным направлением движения электрона. Дело будет выглядеть так, как будто бы электрон превратился в гамма-квант*).

Что же будет дальше?

Каким образом ведёт себя гамма-квант таких энергий? Как он взаимодействует с веществом?

Ливни

В главе V мы рассказывали о том, как было обнаружено образование позитрона гамма-квантами больших энергий. Там упоминалось, что, начиная с энергии в 1 миллион электрон-вольт, в ходе зависимости поглощения гамма-лучей от их энергии наблюдаются аномалии — возникает дополнительное поглощение гамма-лучей, обязанное образованию пар (электрон-позитрон). Вероятность образования гамма-лучами пары частиц растёт с увеличением энергии гамма-квантов, и при очень больших энергиях поглощение гамма-квантов будет почти целиком обусловлено именно образованием пар. Это значит, что гамма-квант большой энергии, взаимодействуя с веществом, превращается в пару частиц — электрон и позитрон. Энергия каждой из этих частиц будет в среднем равна половине энергии кванта. Направление движения этих частиц хотя и не совпадает в общем с направлением движения кванта, будет к нему достаточно близко.

Итак, что же получается? Электрон (а также позитрон), обладающий большой энергией, испускает гамма-квант

---

*) Конечно, испустив гамма-квант, электрон не исчезает, но его энергия оказывается настолько малой, что он уже не может принимать участие в рассматриваемых здесь процессах.

приблизительно такой же энергии, летящий практически в направлении движения электрона. Гамма-квант в свою очередь превращается в две частицы, летящие приблизительно в том же направлении, но с половинной энергией у каждой частицы. Эти новые частицы разделяют судьбу первоначального электрона: на пути порядка 300 *м* воздуха они создадут гамма-кванты.

Каждый из этих двух гамма-квантов образует в свою очередь пару частиц. Дальше, следовательно, будут двигаться уже четыре частицы.

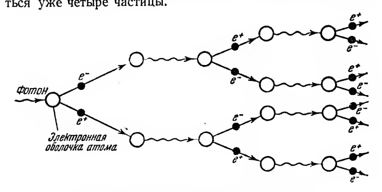


Рис. 41. Схема образования космического ливня.

Нетрудно представить себе и дальнейшее. Пройдя путь ещё в несколько сот метров, эти четыре частицы превратятся в восемь частиц, затем число их дойдёт до шестнадцати, тридцати двух, может быть, до шестидесяти четырёх и более.

Таким образом, в процессе движения быстрого электрона происходит размножение частиц. Рис. 41 наглядно иллюстрирует это размножение. По мере размножения энергия электронов и позитронов (а также и гамма-квантов) уменьшается. Процесс размножения будет проходить до тех пор, пока энергия электронов не уменьшится до такого значения, при котором ионизационные потери начнут превосходить радиационные. В этом случае взаимодействие электронов и позитронов с атомами вещества уже не будет приводить к образованию новых квантов. В воздухе размножение

прекращается при энергии электронов в несколько десятков миллионов электрон-вольт.

Число частиц, образованных в процессе размножения, будет зависеть от первоначальной энергии электрона. Чем больше эта энергия, тем большее число частиц будет образовано электроном.

Итак, согласно теории электроны с энергией в несколько миллиардов или даже сотен миллиардов электрон-вольт не в состоянии пройти через нашу атмосферу. По дороге они образуют большое количество частиц, совокупность которых принято называть «ливнем».

Энергия электронов и позитронов, входящих в состав ливня, не очень велика. Конечно, она зависит от того, насколько сильно развился ливень, ибо, как мы уже указывали, развитие ливня происходит до тех пор, пока энергия частиц не сделается порядка нескольких десятков миллионов электрон-вольт. Электроны такой энергии сравнительно быстро тормозятся в атмосфере.

Однако в том случае, если энергия первичного электрона окажется больше 10^{13} электрон-вольт, ливень, образованный этим электроном, сможет дойти до поверхности Земли (до уровня моря). Очевидно, что в составе такого ливня окажется огромное количество электронов и сам ливень распространится на громадную площадь. Расширение ливня происходит по мере размножения его частиц, так как образующиеся при поглощении гамма-квантов позитроны и электроны летят не строго по направлению движения кванта, а под некоторым, хотя и небольшим, углом к нему. В результате ливень по мере своего развития расширяется. Большие ливни распространяются на площадь в несколько десятков тысяч квадратных метров. Французский физик Оже при помощи системы счётчиков, находящихся друг от друга на расстоянии в несколько десятков и даже сотен метров, обнаружил существование ливней, захватывающих площадь более 10 тысяч квадратных метров. По числу электронов, входящих в такой ливень, Оже определил, что создавшая его первичная частица должна иметь энергию, выражающуюся поистине астрономической цифрой 10^{16} (десять миллионов миллиардов) электрон-вольт.

Описанную картину образования ливней удалось наблюдать и в камере Вильсона. Эти наблюдения оказались воз-

можными потому, что процесс образования ливня, растягивающийся в воздухе на сотни метров, в свинце происходит на сравнительно небольших расстояниях. Из кривых, приведённых на рис. 40, видно, что в то время как в воде (а также и в воздухе) радиационные потери превосходят ионизационные лишь при энергиях электрона, превышающих 100 миллионов электрон-вольт, в свинце уже при энергии в 10 миллионов электрон-вольт радиационные потери начинают преобладать над ионизационными. Кроме того, вследствие большой плотности свинца потери энергии в нём на единицу пути во много раз больше, чем потери в воздухе (1 *г* вещества на 1 *см*^{2} соответствует слою свинца толщиной немного меньше 1 *мм* и слою воздуха толщиной около 10 *м*). Следствием этого и является более быстрое развитие ливней в свинце. Ливень заметно развивается уже в пластинке свинца толщиной в один сантиметр. Кроме того, развитие ливня в свинце продолжается до значительно меньших энергий электронов.

На снимках камеры Вильсона, перегороженной несколькими слоями свинца (рис. XXVII и XXVIII в конце книги), отчётливо видно развитие ливня. Рис. XXIX в конце книги изображает ливень, образованный электроном очень большой энергии; следы ливневых частиц заполняют сплошь всю камеру. Приведённые снимки хорошо иллюстрируют правильность теорий Бете и Гайтлера и построенной на её основе так называемой каскадной теории ливней, в значительной мере разработанной Л. Д. Ландау, И. Е. Таммом и С. З. Беленьким. Изучение поглощения ливневых частиц показало, что в общих чертах оно сходно с поглощением мягкой компоненты космических лучей. Природа мягкой компоненты космических лучей в результате создания теории ливней сделалась более ясной. Зато природа жёсткой компоненты стала ещё более загадочной.

В самом деле, раньше думали, что одиночные частицы, проходящие через значительную толщу свинца и не искривляющие своего пути в магнитном поле, являются электронами или позитронами большой кинетической энергии. Теперь эту гипотезу пришлось отбросить. Электроны и позитроны большой энергии должны образовывать ливни. Поскольку мы наблюдаем след одиночной частицы, значит такие частицы не могут быть ни электронами, ни позитронами. Не

могут быть они также и гамма-квантами. Что же в таком случае представляет собой жёсткая компонента космического излучения?

Открытие мезона

Изучая природу ядерных сил, удерживающих частицы в ядре, Юкава в 1935 г. пришёл к заключению, что для правильного описания характера этих сил нужно предположить существование частиц, масса которых имеет величину, промежуточную между массой протона и массой электрона. По мнению Юкава, такие частицы должны обладать массой, в 100—200 раз большей, чем масса электрона.

Когда было установлено, что частицы, образующие жёсткую компоненту космического излучения, не могут быть ни электронами, ни позитронами, ни гамма-квантами, естественно возникла мысль о том, что может быть частицы, предложенные Юкавой,— «тяжёлые электроны» с массой, в 200 раз большей, чем масса обычного электрона, действительно существуют в природе и представляют собой жёсткую компоненту космического излучения.

В самом деле, свойства таких «тяжёлых электронов» напоминают свойства жёсткой компоненты космического излучения. Известно, что радиационные потери зависят от массы частицы. При описании работы бетатрона мы уже упоминали о том, что радиационные потери уменьшаются обратно пропорционально четвёртой степени массы заряженной частицы. Следовательно, «тяжёлый электрон», обладающий массой, в 200 раз большей обычного электрона, будет испытывать в миллиард раз меньшие радиационные потери, чем обычный электрон той же энергии. Радиационные потери тяжёлых электронов будут так малы, что их величиной (по сравнению с ионизационными потерями) можно пренебрегать и считать, что «тяжёлый электрон», проходя через вещество, теряет свою энергию только на ионизацию молекул этого вещества. Так как ионизационные потери при больших скоростях малы, то тяжёлый электрон, если он обладает большой энергией, способен проходить большие толщи вещества. Вследствие того что «тяжёлый электрон» не испытывает радиационных потерь, он не будет создавать ливни. Таким образом, мы видим, что существует сходство между поведением частиц, составляющих жёсткую компоненту

космического излучеиия, и поведеиием гипотетических «тяжёлых электроиов».

Для того чтобы подтвердить эту гипотезу, иадо было измерить массу этих частиц и убедиться в том, что она действительно в 200 раз больше, чем масса электрона. Экспериментальные даиные, подтверждающие эту гипотезу, были впервые получены Андерсоном и Неддермайером. Они иаблюдали в камере Вильсона прохождеиие космических лучей через свинцовую пластиику и одновремеиио измеряли эиергию этих лучей.

Каким же образом можио было при помощи таких иаблюдеиий устаиовить, что массы этих частиц отличиы от массы электроиа? Сделать это ие очеиь легко, ио всё же можио. Более того, можио определить массы таких частиц. Существует иесколько величии, которые характеризуют массу частицы. К таким величинам относится, иапример, пробег частицы. Чем больше масса частицы, тем меньше (при даиной эиергии) её скорость, а чем меньше скорость частицы, тем больше будут иоиизационные потери и меньше путь, пройденный частицей в веществе.

Одиако пробег зависит не только от массы, ио ещё и от скорости частицы. Поэтому зиаиия одиого только пробега частицы иедостаточио для определеиия массы. К тому же экспериметальио определить пробег ие всегда возможно. Например, для определения пробега частицы в камере Вильсоиа необходимо, чтобы весь путь частицы уложился в пределах камеры. Ясно, что только в тех случаях, когда эиергия частицы уже невелика, т. е. когда в камеру попадает частица с малым пробегом, не превосходящим размеров камеры, удаётся измерить длину пробега. Но если пробег будет мал, то и энергия наблюдаемой частицы будет мала. Зиачит, величииой пробега можио воспользоваться для определения массы только в случае частиц малой энергии.

Коиечно, можно определять массу частицы и по отклоиеиию частицы в магнитном поле. Но и в этом случае, как видно из формулы (2) (стр. 22), мы определяем, собственно говоря, не массу, а количество движения частицы, которое зависит и от массы и от скорости. Значит, и этот способ — косвеииый; кроме того, из-за ограничеииости величииы иапряжёииости магнитиого поля ои пригоден для ие слишком больших энергий.

Можно привлечь к рассмотрению также ионизирующую способность частицы. Ионизирующую способность мы характеризуем числом пар ионов, создаваемых частицей на единице пройденного пути. Собственно говоря, ионизирующая способность частицы определяется не её массой, а её скоростью. Чем больше скорость, тем меньше ионизирующая способность частицы. Однако, комбинируя данные об ионизирующей способности частицы с другими данными, например пробегом частицы или радиусом кривизны её траектории в магнитном поле, можно определить массу частицы. Данные об ионизирующей способности частицы получаются сравнительно легко. Они могут быть получены, например, для частицы, след которой зафиксирован в камере Вильсона или в фотографической пластинке, поэтому ими чаще всего и пользуются при определении массы частицы. Для иллюстрации ионизирующей способности различных частиц мы приводим рис. XXX в конце книги.

Наконец, некоторое представление о массе частиц дают потери энергии в свинцовых пластинках. Эти потери зависят и от энергии частицы и от её массы. Комбинируя результаты этих измерений с ионизирующей способностью частицы, а в некоторых случаях и с искривлением её пути в магнитном поле, можно определить массу частицы. Вот по этому пути и пошли Андерсон и Неддермайер.

Проверяя применимость формулы Бете и Гайтлера для потерь энергий космических лучей в свинце, они обнаружили в камере Вильсона следы таких частиц, которые, проходя свинцовую перегородку, находящуюся в камере, теряли в ней значительно меньшую энергию, чем электроны. Сопоставляя ионизирующую способность этих частиц с их потерей энергии в свинцовой пластинке данной толщины, они определили массу этих частиц. Следует отметить, что такой способ определения массы не очень точен и даёт скорее только представление о массе частицы, чем точное её значение. По данным Андерсона и Неддермайера оказалось, что масса исследуемых частиц имеет промежуточное значение между массой электрона и массой протона и что наиболее вероятное значение массы этих частиц находится между 100 и 200 электронных масс.

На рис. XXXI в конце книги приведён один из снимков, полученных Андерсоном и Неддермайером. Этот снимок изоб-

ражает след частицы, прошедший через счётчик Гейгера-Мюллера, помещённый внутри камеры Вильсона. Величина массы этой частицы была определена в 220 электронных масс. Ошибка в таком определении, как мы уже указывали, значительна, и истинное значение массы может быть и несколько больше или меньше этого числа, однако несомненно, что частица, след которой изображает рис. XXXI, имеет массу, промежуточную между массой электрона и массой протона. Выводы Андерсона и Неддермейера скоро получили подтверждение в опытах других исследователей. Так были найдены новые частицы — мезоны, что значит «промежуточные» (по массе между электронами и протонами).

Период жизни мезонов

Обнаружение мезонов явилось выдающимся открытием, расширившим круг известных элементарных частиц. Оно по новому осветило вопрос о природе космического излучения. Выяснилось также, что мезоны играют большую роль во взаимодействии ядерных частиц. Поэтому началось интенсивное изучение вновь открытых частиц.

Уже первые наблюдения, произведённые при помощи камеры Вильсона, помещённой в магнитном поле, показали, что встречаются мезоны, заряженные как положительно, так и отрицательно. Величина заряда мезона непосредственно не измерена; из косвенных данных следует, однако, что она равна заряду электрона. Сравнительно недавно (1948—1950 гг.) было доказано, что существуют и мезоны, лишённые электрического заряда,— нейтральные мезоны.

Мезоны оказались неустойчивыми частицами. Они недолговечны и распадаются. Время, в течение которого происходит распад мезонов, зависит от их энергии. Медленно движущийся мезон имеет период полураспада, равный $2{,}15 \cdot 10^{-6}$ сек.

При распаде мезона энергия, связанная с его массой, превращается в кинетическую энергию других, более лёгких частиц, возникающих в результате распада. На этом и основан метод измерения периода полураспада мезонов. Чтобы была ясна суть этого метода, обратим внимание читателя на один приём, при помощи которого в настоящее

время определяется направление движения ионизирующих частиц большой энергии.

Представим себе три счётчика Гейгера-Мюллера A, B и C (рис. 42), расположенные так, что оси их параллельны друг другу. Если через все эти три счётчика пройдёт одна и та же ионизирующая частица, то в каждом из счётчиков возникнет разряд. Между возникновением разряда в каждом из счётчиков пройдёт промежуток времени, который требуется, чтобы частица прошла путь между этими счётчиками. Так как скорость частиц, обладающих большой энергией, близка к скорости света, а расстояние между счётчиками равно нескольким десяткам сантиметров, то это время будет порядка 10^{-9} сек. Оно настолько мало, что возникновение разрядов во всех трёх счётчиках можно считать одновременным. Включим все эти счётчики на совпадение. Это значит, что радиотехническая схема, усиливающая импульсы, возникающие при разряде в счётчиках Гейгера-Мюллера, включается так, что она отмечает только те случаи, когда происходит одновременный разряд во всех трёх счётчиках. Если, например, в двух из этих счётчиков произошёл разряд, а в третьем разряде нет, то при включении счётчиков на совпадение такие случаи не будут зарегистрированы. Следовательно, если схема совпадений срабатывает, то это значит, что во всех трёх счётчиках произошёл разряд, т. е., иными словами, через все три счётчика прошла ионизирующая частица. Положение счётчиков и определяет путь частицы. Возможные траектории её указаны на рис. 42. Такая группа счётчиков, предназначенная для определения направления движений космической частицы, называется телескопом.

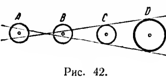


Рис. 42.

Пользуясь телескопом, можно определить не только путь частицы (направление её движения), но и установить, не произошло ли на этом пути превращение частицы. Для этого к счётчикам A, B и C, включённым на совпадение, добавляется ещё один счётчик D, включаемый по схеме антисовпадения. Схемой антисовпадения называется такой способ включения усилительных ламп, при котором по-

следний каскад схемы срабатывает тогда и только тогда, когда в трёх счётчиках, включённых на совпадение, происходит разряд, а в четвёртом дополнительном счётчике D разряда нет. Если во всех четырёх счётчиках произойдёт одновременный разряд, т. е. через все счётчики пройдёт ионизирующая частица, то схема, включённая на антисовпадение, не срабатывает. Следовательно, такая схема регистрирует только те случаи, при которых ионизирующая частица проходит через счётчики A, B и C, но *исчезает* на пути от счётчика C к счётчику D. При помощи такой системы счётчиков и можно определить период полураспада мезонов.

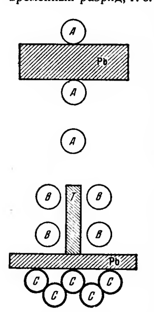


Рис. 43. Схема опытов по определению «времени жизни» мезонов, находящихся в составе космического излучения.

Схема опыта по определению периода полураспада мезонов изображена на рис. 43. На этом рисунке три счётчика A регистрируют направление летящей частицы. Они включены по схеме совпадений. Для того чтобы отделить электроны и позитроны от мезонов, между первым и вторым счётчиками помещён слой свинца толщиной 10 *см* (свинец такой толщины поглощает мягкую компоненту). Электроны и позитроны не смогут пройти через все счётчики A, поэтому одновременный разряд в счётчиках A может произойти только тогда, когда через счётчики (и свинец) пройдёт мезон. Пройдя три счётчика A, мезон попадёт в свинцовый фильтр T. В этом фильтре некоторые мезоны тормозятся полностью, некоторые (в зависимости от их начальной энергии) оказываются способными пройти далее. Чтобы отобрать те случаи, когда в фильтре T мезон полностью затормозился, под фильтром помещён ряд счётчиков Гейгера-Мюллера, обозначенных буквой C. Счётчики C располагаются так, что всякий мезон, прошедший через фильтр T,

пройдёт через какой-нибудь из счётчиков C. Счётчики A и C включаются на антисовпадения, т. е. радиотехническая схема регистрирует только такие случаи, при которых мезон прошёл через все счётчики A и в то же время не прошёл ни через один из счётчиков C. Ясно, что это будет только тогда, когда мезон застрянет в веществе фильтра T.

Застрявший в фильтре T мезон, как мы уже знаем, распадётся, причём в результате такого распада появляется электрон с энергией порядка 100 миллионов электрон-вольт. Для улавливания таких электронов сбоку от фильтра T установлены счётчики, отмеченные буквой B. Так как, однако, распад мезона совершается не мгновенно, то электроны будут попадать в счётчики B не в тот момент, когда срабатывают счётчики C и A, а несколько позже. Поэтому радиотехническая схема была разработана так, что показания счётчиков B регистрировались с некоторым заранее заданным запаздыванием по отношению к счётчикам C и A. Меняя время запаздывания и измеряя число частиц, регистрируемое счётчиками B, можно определить скорость распада мезона. Как мы упоминали выше, период полураспада мезона оказался равным $2{,}15 \cdot 10^{-6}$ сек.

Мезоны составляют жёсткую компоненту космического излучения. На уровне моря 70 % космического излучения состоит из мезонов. Мезоны большой энергии в состоянии проходить значительные толщи свинца, однако они не могут пробежать большой путь в воздухе вследствие кратковременности своего существования. Поэтому мезоны не могут входить в состав первичного космического излучения, приходящего на землю из мирового пространства. Это — вторичные образования, создающиеся в земной атмосфере.

О массе мезонов

Интересный метод определения массы мезонов был разработан группой советских учёных, возглавляемой А. И. Алихановым и А. И. Алиханяном.

Эта группа учёных организовала в 1943—1945 гг. в Армении на горе Алагёз на высоте 3250 *м* постоянно действующую станцию по изучению космического излучения. Работа этой станции продолжается и поныне. На эту высоту был

поднят специальный постоянный магнит, который создавал сильное магнитное поле в большом объёме (величина межполюсного зазора была равна 8 *см* × 12 *см* × 50 *см*, а напряжённость поля — 3840 эрстед). Полюсы магнита имели в сечении вид прямоугольника со сторонами 50 *см* × 12 *см*. Магнит устанавливался таким образом, чтобы с вертикалью совпадала сторона этого прямоугольника, равная 50 *см*. Делалось это для того, чтобы космические частицы, идущие сверху вниз, проходили возможно более длинный путь в магнитном поле. При помощи этого магнита изучалось отклонение мезонов магнитным полем. Величина этого отклонения давала возможность определить массу мезона.

Для измерения величины отклонения мезона была создана установка, схема которой приведена на рис. 44. Три ряда счётчиков диаметра (*I*, *II* и *III*) фиксируют путь частицы. Первые два ряда счётчиков, расположенные над полюсами магнита, предназначены для определения пути частицы до вступления её в магнитное поле, третий ряд счётчиков отмечает изменение в направлении движения частицы, связанное с прохождением ею 50 *см* пути в магнитном поле напряжённостью 3840 эрстед. Определение пути частицы производится следующим образом: с каждым из счётчиков Гейгера-Мюллера, входящих в упомянутые три ряда счётчиков, связана неоновая лампочка, дающая вспышку в тот момент, когда через соответствующий счётчик проходит ионизирующая частица.

Все эти группы счётчиков включены на совпадения, т. е. схема регистрирует только такие случаи, когда частица проходит через счётчики, находящиеся во всех трёх рядах. В этом случае включается в действие киноаппарат и на киноплёнке отмечается, какие именно три неоновые лампочки загораются. Установив, какие из счётчиков, находящихся в рядах *I*, *II*, *III*, сработали, мы определим, какое отклонение испытала частица, пройдя через магнитное поле.

Оси счётчиков устанавливались вдоль силовых линий магнитного поля, т. е. перпендикулярно к полюсам магнита. Магнитное поле направлено параллельно плоскости рисунка.

Однако одного определения отклонения частицы в магнитном поле от прямолинейного направления ещё недостаточно для определения её массы.

Как мы уже указывали, отклонение заряженной частицы в магнитном поле определяет не массу, а её импульс, т. е. произведение массы на скорость.

Для того чтобы получить суждение о скорости частицы, изучалось поглощение частиц в свинце. С этой целью под

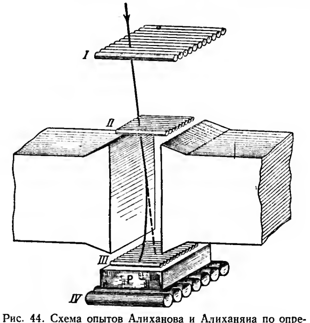


Рис. 44. Схема опытов Алиханова и Алиханяна по определению масс частиц, входящих в состав космического излучения.

третьим рядом счётчиков помещался свинцовый блок P толщиной 5,4 *см*. Под этим блоком располагался четвёртый ряд счётчиков (IV), включаемый на антисовпадения с первыми тремя рядами счётчиков. Включение четвёртого ряда счётчиков на антисовпадения с первыми тремя означает, что радиотехническое устройство, приводящее в действие киноаппарат, срабатывает только тогда, когда частица проходит какие-либо из счётчиков каждого из рядов I, II, III и не проходит ни через один из счётчиков ряда IV.

Таким образом, на получающихся фотографиях вспышек неоновых лампочек регистрируются только такие случаи, когда через три ряда счётчиков проходит частица, застревающая потом в свинцовом блоке.

Однако трёх рядов счётчиков оказалось недостаточным, чтобы можно было надёжно определять траекторию частицы, и в последующих опытах число рядов счётчиков было доведено до пяти. Было также увеличено и магнитное поле. В процессе исследований было обнаружено довольно много случаев, когда частицы, слабо отклоняемые магнитным полем, поглощались в свинцовом фильтре. Если бы такие частицы имели массу в 200 электронных масс (предполагаемое значение массы мезотрона), то наблюдаемое слабое отклонение их в магнитном поле означало бы, что они обладают большой энергией, во всяком случае достаточной, чтобы пройти слой свинца в 5,4 *см*. Между тем частицы в таком слое свинца полностью тормозятся. Это можно объяснить, только предположив, что масса рассматриваемой частицы больше, чем 200 электронных масс. В самом деле, чем больше при данном импульсе масса частицы, тем меньше её скорость и энергия, тем сильнее частица тормозится в свинцовом фильтре.

Уже первые результаты исследований Алиханова и Алиханяна показали, что среди частиц, проходящих между полюсами магнита, имеются не только мезоны с массой в 200 электронных масс, но также и другие частицы с массой, промежуточной между 200 электронных масс, и массой протона. В последующем, улучшив свою установку, они нашли, что существуют частицы с массой, близкой к 300, 600 и 900 электронным массам.

Ещё более интересные данные о мезонах были получены при помощи толстослойных фотопластинок. Если взять пластинки с мелкозернистой фотоэмульсией, то по характеру следа можно различать частицы разной ионизирующей способности. Чем больше ионизирующая способность частицы, тем больше почерневших зёрен эмульсии обнаружится на её пути после проявления пластинки. По количеству почерневших зёрен, приходящихся на единицу длины пути частицы, можно судить об ионизирующей способности, а значит, и о скорости частицы. Следовательно, по следу частицы в фотоэмульсии, так же как и в камере Вильсона, мы можем судить о её скорости. Однако регистрация

следов в фотоэмульсии обладает целым рядом преимуществ.

В фотоэмульсии можно зафиксировать пробег частиц значительно большей энергии, чем в камере Вильсона. Плотность фотоэмульсии примерно в 2000 раз больше плотности воздуха, поэтому частица, проходящая в камере Вильсона 10 *см*, в фотоэмульсии пройдёт всего 50 микрон. Современные толстостенные фотопластинки имеют толщину в несколько миллиметров. В таких пластинках (если слой эмульсии расположен вертикально) частица может пройти путь до десятка сантиметров. Та же частица прошла бы в камере Вильсона путь, приблизительно равный 200 *м*.

Возможность измерять пробеги частиц с большой энергией является существенным преимуществом метода фотоэмульсий. Другим немаловажным преимуществом этого метода является то, что пачку фотопластинок можно подвергать облучению космическими лучами в течение времени, достаточно длительного для того, чтобы зафиксировать на одной пластинке (точнее в одной пачке пластинок) множество самых разнообразных случаев взаимодействия космических частиц. Вследствие этого фотопластинки особенно удобны для регистрации редких процессов и в них удаётся наблюдать некоторые детали превращения частиц, ускользающие обычно при работе с камерой Вильсона.

В 1947 г. Поуэлл и Оккиалини опубликовали результаты своих замечательных исследований следов космических частиц в толстослойных фотоэмульсиях. На некоторых фотографиях, полученных этими учёными, одна из которых воспроизводится на рис. XXXII в конце книги, виден конец пути частицы (эта частица обозначена на рис. XXXII буквой π). След, оставленный этой частицей в эмульсии фотопластинки, очень длинный, значительно больше, чем поле зрения микроскопа, в котором этот след рассматривается. Поэтому, чтобы получить полное изображение этого следа, пришлось составить мозаику из многих микрофотографий.

По расположению почерневших зёрен эмульсии, точнее, по числу этих зёрен, образующихся на единице длины пути, можно определить скорость частицы, а по длине следа — её энергию. В сочетании с известной величиной скорости

данные об энергии позволяют вычислить массу этой частицы. Было найдено, что она примерно в 300 раз больше массы электрона.

Направление движения частицы определяется легко. Движущаяся частица постепенно теряет свою энергию; при этом скорость её уменьшается, а с уменьшением скорости, как мы знаем, ионизирующая способность частицы возрастает. Чем выше ионизирующая способность, тем больше будет почерневших зёрен. Следовательно, движение частицы, оставившей след в эмульсии, происходит от места, где наблюдается малая плотность почерневших зёрен, к месту, где плотность зёрен наибольшая. Конец пробега характеризуется наибольшей густотой почерневших зёрен.

На приведённом снимке мы видим, что в точке A, где кончился пробег частицы с массой 300 m_e*), возникла новая частица, весь пробег которой уместился на той же фотопластинке (эта частица обозначена на рис. XXXII буквой μ). Измерение пробега этой частицы, а также её ионизирующей способности (по числу почерневших зёрен) позволило определить массу этой частицы. Она оказалась равной примерно 200 m_e. Таким образом, рис. XXXII иллюстрирует превращение одной частицы с массой 300 m_e в другую частицу с массой около 200 m_e.

На основании этих данных, а также результатов исследований других аналогичных снимков, Поуэлл и Оккиалини пришли к заключению, что, кроме мезонов с массой, близкой к 200 m_e, должны существовать мезоны с массой, приблизительно равной 300 m_e. Мезоны с массой 200 m_e они назвали «мю-мезонами» (μ), а мезоны с массой 300 m_e — «пи-мезонами» (π).

В 1947 г. мезоны были получены искусственно. Появление мезонов удалось обнаружить при бомбардировке бериллия, углерода, меди и урана альфа-частицами, ускоренными в синхроциклотроне до энергии, большей 300 миллионов электрон-вольт. С повышением энергии альфа-частиц количество наблюдаемых мезонов увеличивалось. По отклонению этих мезонов в магнитном поле и по их пробегу можно было определить как знак заряда мезонов, так и величину их массы.

---

*) m_e означает массу покоящегося электрона.

Выяснилось, что существуют π-мезоны, заряженные как положительно, так и отрицательно. Масса тех и других π-мезонов одинакова и равна 276 m_e. μ-мезоны также встречаются обоих знаков заряда. Масса их равна 212 m_e.

Наряду с заряженными π-мезонами удалось установить существование нейтральных π-мезонов*). Поскольку эти частицы лишены заряда, они не ионизируют вещества, а потому не оставляют следа в фотоэмульсиях. Заключение об их существовании было сделано на основании косвенных данных — по появлению гамма-квантов с энергией порядка 100 миллионов электрон-вольт, на которые распадается нейтральный π-мезон.

Масса π^0-мезона, установленная на основе данных об энергии гамма-квантов, оказалась несколько меньше массы заряженных π-мезонов; она равна 264 m_e. Время жизни π^0-мезона — всего около $3 \cdot 10^{-14}$ сек.

Превращения ядер, вызываемые π-мезонами, и превращения самих π- и μ-мезонов

Изучая следы π-мезонов в эмульсии, Поуэлл и Оккиалини обнаружили много случаев, когда π-мезоны проникали в ядра атомов, входящих в состав эмульсии, и разрушали эти ядра. На рис. XXXIII в конце книги показаны фотографии таких превращений.

Проникая в ядро́, π-мезон приносит с собой большую энергию, за счёт которой многие частицы — протоны, нейтроны, альфа-частицы — покидают ядро. Лёгкие ядра, такие, как ядра углерода, азота, кислорода, могут при этом полностью разрушиться — распасться на отдельные частицы. Произойдёт как бы взрыв таких ядер. Частицы, образующиеся при таком взрыве, можно наблюдать по следам, которые они оставляют в эмульсиях. На рис. XXXIII изображены разрушения π-мезонами именно таких лёгких ядер. На каждом снимке видны следы 3—4 частиц, возникших в результате взрыва. След π-мезона обрывается в точке, где возникает взрыв. Очевидно, π-мезон поглощается ядром.

На первый взгляд может показаться, что частиц на фотографиях слишком мало. Ведь в ядре углерода двенадцать

*) Нейтральные π-мезоны обозначают π^0 в отличие от заряженных π^+ и π^-.

частиц, а в ядре кислорода — шестнадцать. Но дело в том, что не все частицы, находящиеся в ядрах, являются ионизирующими. Нейтроны, как и всякие нейтральные частицы, не производят ионизации, поэтому следы их движения в эмульсии не видны. Заряженных частиц (протонов, альфа-частиц), способных производить ионизацию, значительно меньше. В ядре углерода 6 протонов, в ядре кислорода — 8. Однако при распаде ядер не всегда вылетают протоны, иногда наблюдаются альфа-частицы, содержащие, как известно, 2 протона и 2 нейтрона. Вылет альфа-частиц уменьшает возможное видимое число частиц. Например, если бы при распаде ядра вылетали только альфа-частицы, мы должны были бы наблюдать при распаде ядра углерода только три частицы, а при распаде ядра кислорода всего четыре частицы. В действительности вылетают и протоны, и альфа-частицы, и нейтроны.

Рассмотренные снимки, как и большое количество других, показывают, что π-мезоны являются *ядерно-активными частицами*. Этот термин подчёркивает способность π-мезонов активно взаимодействовать с атомными ядрами и при встрече с ядром возбуждать его превращение за счёт сообщаемой ядру большой энергии.

Превращения ядер совершают как быстрые, так и медленные π-мезоны, но по-разному. Отрицательные π-мезоны производят превращение ядер значительно чаще, чем положительные. Причину подобного различия понять нетрудно. Заряд ядра положителен. Поэтому мезоны, несущие отрицательный заряд, притягиваются ядрами. Отрицательным мезонам не надо обладать значительной кинетической энергией, чтобы проникнуть в ядро. Поэтому даже медленные отрицательные мезоны могут попасть в ядро и передать ему энергию, связанную с массой мезона. Положительно заряженные мезоны отталкиваются ядром. Поэтому положительный мезон должен обладать большой кинетической энергией, чтобы преодолеть это отталкивание и проникнуть в ядро. Это различие во взаимодействии мезонов с ядрами и является причиной того, что ядра чаще разрушаются отрицательными π-мезонами, чем положительными.

Ядерная активность π-мезонов проявляется не только в их способности возбуждать ядерные превращения; π-мезоны сами часто возникают в результате разрушения тяжёлых

и лёгких ядер космическими частицами (протонами, альфа-частицами). На рис. XXXIV показан взрыв ядра, вызванный космической частицей. На нём видны не только следы тяжёлых частиц, но и π-мезонов, возникших в результате взрыва ядра.

Свойства μ-мезонов существенно отличаются от свойств π-мезонов. μ-мезоны оказались частицами невзаимодействующими или очень слабо взаимодействующими с атомными ядрами.

При ядерных взрывах, вызванных космическими частицами, часто наблюдается появление π-мезонов, но не обнаруживается появления μ-мезонов. Разрушение ядер под действием протонов и альфа-частиц большой энергии в настоящее время осуществляется лабораторным путём. Среди частиц, образующихся в процессе такого разрушения, часто обнаруживают π-мезоны, но не находят μ-мезонов. Не обнаружены также и случаи разрушения ядер μ-мезонами. μ-мезоны оказались *ядерно-неактивными частицами.*

В связи с этим любопытно отметить, что впервые мысль о возможном существовании мезонов зародилась в результате поисков объяснения характера ядерных сил. Как указывалось, Юкава считал, что ядерные взаимодействия обусловлены частицами с массой, равной 100—200 m_e. Открытие μ-мезонов в составе космического излучения на уровне моря, казалось, подтвердило гипотезу Юкавы, ибо масса этих мезонов близка к 200 m_e. Однако сопоставление свойств π- и μ- мезонов показывает, что ядерно-активными являются π-мезоны и что, следовательно, ядерные силы связаны с действием π-, а не μ-мезонов.

Если μ-мезоны не являются ядерно-активными частицами и не возникают при разрушении атомных ядер, то как же объяснить, что вблизи поверхности земли и на небольших высотах в составе вторичного космического излучения преобладают именно эти мезоны. Где и как они образуются?

Обратимся к уже рассмотренному нами ранее рис. XXXII. Он является бесспорным свидетельством превращения π-мезона в μ-мезон. Следовательно, μ-мезоны возникают в результате распада π-мезонов. На больших высотах преобладают π-мезоны, возникающие в результате разрушения ядер первичными космическими частицами. Но π-мезоны

живут очень недолго и не успевают близко подойти к поверхности Земли.

Превращение π-мезонов в μ-мезоны сопровождается появлением нейтральных частиц (повидимому, так называемых нейтрино, о которых мы расскажем дальше). Поскольку при распаде π-мезона не наблюдается других заряженных частиц, кроме μ-мезона, можно считать, что распад π-мезонов совершается по схеме:

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu,$$
$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \nu,$$

т. е. положительно заряженный π-мезон превращается в положительно заряженный μ-мезон, а из отрицательного π-мезона возникает отрицательный μ-мезон. Буквой ν обозначена нейтральная частица (нейтрино).

Среднее время жизни π-мезона оказалось равным $2{,}6 \cdot 10^{-8}$ сек., т. е. почти в 100 раз меньше среднего времени жизни μ-мезона.

При распаде μ-мезона возникает электрон или позитрон, в зависимости от знака заряда μ-мезона, и две нейтральные частицы (два нейтрино)

$$\mu^+ \rightarrow e^+ + 2\nu,$$
$$\mu^- \rightarrow e^- + 2\nu.$$

В итоге мы приходим к выводу о существовании длинной цепи превращений:

$$\text{ядро} \rightarrow \pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm}.$$

Три последних звена этой цепи ($\pi \rightarrow \mu \rightarrow e$-распад) удалось зарегистрировать на ряде фотографий с толстослойных фотопластинок (см. рис. XXXV в конце книги).

Тяжёлые мезоны

Исследования Поуэлла и Оккиалини, Алиханова и Алиханяна и многих других показали, что кроме π- и μ-мезонов существуют ещё и другие, более тяжёлые мезоны, а также частицы с массой, промежуточной между массой протона и дейтрона. Все эти частицы неустойчивы, они распадаются, и время их жизни невелико. Распадаясь, они пре-

вращаются в другие, уже известные нам частицы — π- и μ-мезоны, электроны и позитроны. По следам этих превращений мы и можем обнаруживать такие мезоны, а также устанавливать их свойства и определять массу.

В настоящее время можно считать установленным существование мезонов, обладающих следующими значениями масс:

а) *Мезоны с массой, близкой к* 500 m_e. Масса этих мезонов установлена не очень точно. По данным Алиханяна такие мезоны ядерно-неактивны, так же как и μ-мезоны. Среди частиц, появляющихся при ядерных взрывах, мезоны с массой 500 m_e не наблюдаются. Повидимому, они являются продуктом распада более тяжёлых мезонов.

б) *Тэта-мезоны* (θ^0- и $\theta^\pm$-мезоны). Нейтральные и заряженные мезоны с массой, близкой к 800 m_e. Распадаются по схемам:

$$\theta^0 \longrightarrow \pi^+ + \pi^-,$$
$$\theta^\pm \longrightarrow \pi^\pm + \pi^0.$$

Среднее время жизни θ^0-мезонов порядка $1{,}7 \cdot 10^{-10}$ сек. Среднее время жизни $\theta^\pm$-мезонов пока измерить не удалось.

в) *К-мезоны* — заряженные мезоны с массой, близкой к 1250 m_e. Распадаются по схеме:

$$K^\pm \longrightarrow \pi^\pm + \theta^0.$$

Среднее время жизни K-мезона порядка 10^{-9} сек.

г) *Тау-мезоны* (τ-мезоны). τ-мезоны имеют массу 970 m_e. Встречаются τ-мезоны с положительными и отрицательными зарядами; τ-мезоны распадаются на три лёгких мезона:

$$\tau^\pm \longrightarrow \pi^\pm + \pi^+ + \pi^-,$$
$$\tau^\pm \longrightarrow \pi^\pm + \pi^0 + \pi^0.$$

Среднее время жизни τ-мезонов равно приблизительно 10^{-8} сек. На рис. XXXVI, помещённом в конце книги, приведена микрофотография, на которой виден распад τ-мезона на три π-мезона.

д) *Каппа-мезоны* (κ-мезоны). Масса κ-мезонов приблизительно равна 1250 m_e. Вероятной схемой превращения κ-мезонов является следующая:

$$\varkappa^\pm \longrightarrow \mu^\pm + 2 \text{ нейтральные частицы.}$$

Гипероны

Установлено, что среди следов различных частиц в фотоэмульсиях обнаруживаются и такие, которым необходимо приписать массу, большую, чем масса протона. Такие частицы были названы *гиперонами*.

Гипероны, как и мезоны, являются промежуточными частицами. Но в отличие от мезонов масса гиперона заключена между массой протона (1836 m_e) и массой дейтрона (3672 m_e). Гипероны, подобно мезонам, являются неустойчивыми образованиями. Время их жизни порядка 10^{-10} сек. В результате распада гиперона образуется одна ядерная частица (протон или нейтрон) и π-мезон.

Нейтральный гиперон обозначают Λ^0 (лямбда нуль-частица). Масса нейтрального гиперона равна 2180 m_e. Он распадается на протон и отрицательный π-мезон:

$$\Lambda^0 \longrightarrow p + \pi^-.$$

Среднее время жизни нейтрального гиперона равно $3{,}7 \cdot 10^{-10}$ сек. На рис. XXXVII приведена фотография, полученная с камерой Вильсона, на которой видны следы частиц, образовавшихся в результате распада Λ^0-частицы. По ионизирующей способности и пробегу эти частицы отождествлены с протоном и π-мезоном. По длине пробегов этих частиц можно определить энергию протона и π-мезона, а следовательно, и массу Λ^0-частицы, из которой они образовались. Следа самого гиперона не видно, откуда следует, что гиперон, распад которого зафиксирован в камере, не имел заряда.

Наблюдались также следы заряженных гиперонов. Масса заряженных гиперонов, следы которых удалось обнаружить, оказалась несколько большей массы нейтрального гиперона. Она приблизительно равна 2330 m_e. Среднее время жизни заряженных гиперонов (их обозначают $\Lambda^{\pm}$) определено не очень точно. Оно приблизительно равно $3 \cdot 10^{-10}$ сек. Вероятные схемы распада заряженного гиперона следующие:

$$\Lambda^+ \longrightarrow p + \pi^0,$$
$$\Lambda^+ \longrightarrow n + \pi^+,$$
$$\Lambda^- \longrightarrow n + \pi^-.$$

В этих схемах буквой p обозначен протон, буквой n — нейтрон.

Наряду со следами частиц с массой 2330 m_e обнаружены следы ещё более тяжёлых частиц, масса которых оказалась равной приблизительно 2580 m_e (приблизительно равна 1,4 массы протона). Эти частицы были названы *каскадными гиперонами*. Каскадный гиперон принято обозначать большой буквой «омега» (Ω). Пока обнаружены каскадные гипероны, несущие отрицательный заряд (Ω^-). Существование положительно заряженных и нейтральных каскадных гиперонов не установлено.

Каскадные гипероны также неустойчивы и распадаются в течение короткого промежутка времени. Время их жизни определить ещё не удалось. Отрицательно заряженный каскадный гиперон, распадаясь, превращается в нейтральный Λ^0-гиперон по схеме:

$$\Omega^- \longrightarrow \Lambda^0 + \pi^-$$
$$\searrow$$
$$p + \pi^-.$$

В результате распада отрицательного каскадного гиперона возникает протон и два отрицательных π-мезона. Однако протон появляется не сразу, а в ходе ступенчатого процесса. Сначала каскадный гиперон превращается в Λ^0-частицу и π^--мезон, а затем уже Λ^0-частица превращается в протон и π^--мезон. Именно потому, что образование устойчивой частицы (протона) происходит в две ступени, исходная частица (гиперон) получила название каскадной.

Наши знания о тяжёлых мезонах и гиперонах пока ещё весьма скромны. Основным источником сведений о свойствах этих частиц является изучение космических лучей. Промежуточные частицы встречаются довольно редко, и поэтому изучение их свойств является делом сравнительно трудным. Однако в ближайшее время и в этой области многое должно измениться.

Мы уже указывали, что в настоящее время действуют установки, способные сообщать протонам энергию более миллиарда электрон-вольт. Столь быстрые частицы могут создавать как тяжёлые мезоны, так и гипероны в лабораторных условиях. Это поможет быстрее разобраться в необы-

чайных свойствах промежуточных частиц, понять их природу и выяснить вклад этих частиц в ядерные силы.

При помощи такого ускорителя в декабре 1955 г. было сделано новое замечательное открытие. Американские физики Чемберлен, Сегре, Унганд и Ипсилантис обнаружили частицы, обладающие массой протона, но заряженные отрицательно. Такие частицы назвали *антипротонами*.

Учёные давно занимались поисками подобных частиц. В самом деле, мы знаем, что электроны бывают двух видов — с отрицательным или положительным зарядом. π-, μ- и K-мезоны также имеют заряды обоих знаков. Однако протоны всегда встречались только с положительным зарядом. Можно было ожидать, что если протоны могут зарождаться подобно позитронам и электронам, то должна быть частица с массой, равной массе протона, но обладающая отрицательным зарядом. Такая пара частиц — протон и антипротон — должна была бы появляться одновременно. На создание такой пары потребовалась бы энергия более четырёх миллиардов электрон-вольт.

Появление антипротонов и было обнаружено при бомбардировке меди протонами с энергией 6,2 миллиарда электрон-вольт. Протоны и антипротоны, соединяясь, исчезают, образуя большое количество мезонов.

Ещё о природе космических лучей

Со времени открытия космических лучей наши представления о них претерпели значительные изменения. Как мы уже отмечали, на ранней стадии изучения свойств космических лучей считалось, что они представляют собой электромагнитное излучение с очень малой длиной волны.

Опыты Ботэ—Кольхёрстера, с одной стороны, и Д. В. Скобельцына, с другой, утвердили другую гипотезу: космические лучи — это электроны. Однако Скобельцын первый заметил, что бо́льшая часть наблюдённых электронов имеет земное происхождение. Они создаются в результате взаимодействия каких-то первичных частиц с нашей атмосферой.

В настоящее время считают, что электроны не являются первичными космическими частицами. Убеждение это основывается на двух фактах. Первый из них связан с влиянием, оказываемым магнитным полем земли на космические ча-

стицы. Как мы уже отмечали, магнитное поле земли отклоияет космические лучи, идущие к нам иа землю, к магнитиым полюсам. Те из космических частиц, энергия которых не очеиь велика, будут отклоиены иа полюс. Однако частицы с большей энергией смогут достигиуть экватора. Магнитиое поле действует иа космические частицы потому, что они имеют заряд. Каков же знак заряда космических частиц? Мы знаем уже, что заряды разного зиака отклоняются магиитным полем в разных направлениях. Расчёт показывает, что положительно заряженные частицы отклоияются земным магнитным полем к востоку, т. е. будут проходить иа землю с запада. Отрицательно заряженные частицы, наблюдаемые вблизи экватора, будут приходить с востока.

Для выяснеиия вопроса о знаке заряда первичных космических частиц группой советских учёных во главе с С. Н. Вериовым была организоваиа иа советском судне экспедиция в экваториальиые широты. Там на шарах-зоидах в стратосферу поднимались группы счётчиков Гейгера-Мюллера (телескопы), которые могли при помощи специального устройства ориеитироваться то иа запад, то на восток. Сигналы от телескопов передавались по радио и принимались устаиовками, иаходившимися иа судне. Исследования Вериова показали, что первичиые космические частицы приходят иа землю с запада, а следовательио, оии иесут положительный заряд.

Следует отметить, что в 1939 г. американец Джонсои произвёл иаблюдеиия с целью устаиовить иаправлеиие полёта первичиых космических частиц. Он пришёл к ошибочному выводу, будто космические частицы в одинаковой мере направлеиы как с запада на восток, так и с востока иа запад. Этот вывод в течеиие почти десяти лет создавал путаиицу в представлениях о природе космического излучеиия. Лишь в результате работ Вериова стало ясно, что вывод Джонсоиа невереи, так как ои, повидимому, имел дело ие с первичными космическими частицами.

Второе обстоятельство, показывающее, что первичные космические лучи — ие электроны, заключается в следующем.

Известио, что электроны, проходящие в иашей земной атмосфере, размножаются — создают ливни. Чтобы такой

ливень мог дойти до поверхности земли, не поглотившись в атмосфере, первичный электрон должен обладать значительной энергией (порядка 10^{13} электрон-вольт). Наблюдения, произведённые Верновым, показали, что электронов таких энергий в верхних слоях атмосферы нет. Значит, не электроны вызывают все те многочисленные вторичные частицы, которые мы наблюдаем у поверхности земли и на небольших высотах.

Позитроны и мезоны также не могут быть первичными космическими частицами. Они недолговечны и имеют явно вторичное происхождение (возникают в земной атмосфере).

Что же представляют собой первичные космические частицы?

В последнее время накоплено много данных, свидетельствующих о том, что подавляющее число приходящих к нам на землю космических частиц является протонами.

Конечно, мы не наблюдаем протоны в составе космического излучения у поверхности земли, так как они поглощаются земной атмосферой. Однако на больших высотах протонов довольно много, и их число растёт с высотой.

Протоны — не единственные частицы, входящие в состав космических лучей. Состав их весьма сложен.

Некоторые заключения о составе космических лучей могут быть сделаны на основании данных, полученных при полётах в стратосферу. Обратим снова внимание читателя на рис. 17. Из этого рисунка видно, что интенсивность космического излучения, начиная с высоты около 50 *км* и до высоты 160 *км*, не изменяется. Объяснить этот факт нетрудно. Проходя в земной атмосфере до этих высот, первичные частицы встречают столь малый слой вещества (выше 50 *км* находится слой вещества, равный одной тысячной от слоя вещества, заключённого во всей атмосфере), что вторичные процессы ещё не успевают развиться в заметной мере. Поэтому можно считать, что подавляющая часть космических частиц на этих высотах является первичными частицами. Более того, значительная доля первичных частиц достигает и меньших высот.

Наблюдения при помощи фотопластинок, произведённые на высотах более 25 *км*, обнаружили частицы большой энергии, обладающие *большим зарядом*. Ниже 20 *км* существование таких частиц не обнаружено. Рядом наблюдений,

в частности и тем, что даже на высоте 30 *км* эти частицы имеют преимущественное направление сверху вниз, установлено, что эти частицы — первичного происхождения.

Как же можно отличить частицы, обладающие большим зарядом, от других частиц? Отличить их можно по величине ионизирующей способности. Согласно теории, ионизирующая способность частицы изменяется, как отношение $\frac{Z^2}{v^2}$, где Z — заряд частицы, а v — её скорость. Следовательно, частицы с большим зарядом должны обладать громадной ионизирующей способностью (см. рис. IX в конце книги). Следы таких частиц, необычайно сильно ионизирующих, и были обнаружены в эмульсиях фотопластинок, поднятых на высоту в 30 *км*. Представление об ионизирующей способности этих частиц дают рис. IX и XXXVIII в конце книги.

На рис. IX виден след, образованный частицей в фотоэмульсии. Ионизация, производимая этой частицей, столь велика, что в её следе не видно отдельных зёрен, а образуется сплошная полоска из проявившегося серебра. Приведённый масштаб даёт представление о размерах этой полоски. На рис. XXXVIII приведены сравнительные снимки следа, оставленного в эмульсии альфа-частицей, излучённой при распаде тория, со следами, оставляемыми космической частицей с большим зарядом. Видно, что по мере уменьшения энергии таких частиц производимая ими ионизация возрастает. Оценённый по величине ионизирующей способности и по длине пробега заряд этой частицы оказался равным 15 элементарным единицам.

Изучение таких многозарядных частиц показало, что среди них наблюдаются частицы с зарядом *от шести до сорока*. Что же представляют собой частицы с таким большим зарядом?

Внимательное рассмотрение следов, оставленных ими в эмульсии фотопластинки, убеждает нас в том, что они представляют собой ядра тяжёлых элементов. Когда энергия этих ядер сильно уменьшается, они начинают захватывать электроны, что видно по уменьшению их ионизирующей способности. Процесс захвата электронов продолжается до тех пор, пока электронная оболочка этих атомов не заполняется полностью.

Замечательиым оказалось распределение тяжёлых частиц по величиие их заряда, приведёииое иа рис. 45. Оио соответствует астроиомическим даииым о распространении элементов во вселеииой. В частиости, элемеиты литий, бериллий и бор, малая распространёиность которых хорошо известна астрофизикам, не найдеиы среди первичных космических частиц.

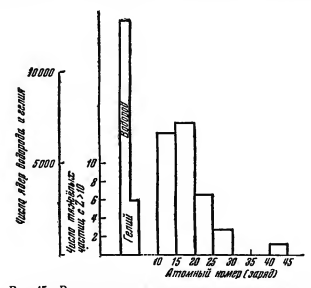


Рис. 45. Распределение многозарядных частиц космического излучения по величине заряда. Распределение приведено для водорода и гелия и для частиц, у которых Z больше 10. По оси ординат даны два масштаба: один для водорода и гелия, другой — для частиц с Z, большим 10.

Другим замечательным свойством, обиаружеиным в этих опытах, явилось соотиошеиие между зарядом частицы и её эиергией. Эиергия частиц оказалась пропорциональиой заряду. На едииицу заряда приходится энергия, равиая 2—3 миллиардам электрон-вольт.

Общее число тяжёлых космических частиц (с зарядом ядра, бóльшим 10) таково, что на квадратиый саитиметр в течеиие часа (в телесиом угле, равиом единице) приходит

одна частица. Это означает, что тяжёлые частицы составляют $\frac{1}{400}$ числа протонов, приходящих на нашу Землю.

Итак, первичное космическое излучение имеет сложный состав; в основном оно состоит из протонов и ядер гелия (последних лишь в четыре раза меньше, чем протонов); кроме них, имеются ядра тяжёлых элементов вплоть до ниобия.

Что же происходит, когда первичная космическая частица (протон или ядро, имеющее большой заряд) попадает в земную атмосферу?

Долгое время на этот вопрос нельзя было дать ответа. Сейчас в результате многочисленных и длительных исследований Д. В. Скобельцына и его сотрудников, главным образом Н. А. Добротина и Г. В. Зацепина, выявились общие черты тех явлений, которые сопровождают проникновение первичных частиц в земную атмосферу. По мнению Д. В. Скобельцына, в результате взаимодействия первичной космической частицы с ядрами атомов происходят «ядерные взрывы», сопровождающиеся образованием потоков из большого количества частиц. На фотографии XXXIV, приведённой в конце книги, мы видим следы частиц, возникших в результате такого взрыва. Взрыв вызван частицей с зарядом, равным 13 — ядром алюминия. Среди частиц, образующихся в результате ядерного взрыва, часто оказывается много таких, которые сами способны взрывать новые атомные ядра. В результате таких взрывов образуется ливень частиц. Но эти ливни существенно отличаются от ливней, создаваемых электронами или гамма-квантами больших энергий. Различие между этими ливнями лежит как в механизме возникновения ливней, так и в характере частиц, образующих ливень.

Электронные ливни создаются в пространстве вблизи ядер и состоят из электронов, позитронов и гамма-квантов. Ливни, образующиеся в результате ядерных взрывов, возникают в процессах, происходящих внутри ядер, и состоят из частиц трёх типов. Первая группа частиц представляет собой ядерные частицы — протоны, нейтроны, более тяжёлые ядерные осколки, гипероны, тяжёлые мезоны. Среди этой группы частиц находятся и такие, которые развивают ливень — создают новые ядерные взрывы. Вторая группа частиц — это частицы, не образующие ливней, повидимому

ядерно-неактивные мезоны. Наконец, третья группа частиц состоит из электронов и позитронов. Эти электроны и позитроны не возникают непосредственно при ядерном взрыве, а являются продуктами распада мезонов.

Все эти сложные превращения схематически можно представить следующим образом:

$$\text{Первичные протоны} \longrightarrow \left[\begin{array}{c}\text{электроны,}\\ \text{мезоны,}\\ \text{ядерно-активные}\\ \text{частицы}\end{array}\right] \longrightarrow \left[\begin{array}{c}\text{каскадные}\\ \text{процессы}\\ \text{(ливни)}\end{array}\right].$$

Наличие среди продуктов «ядерного взрыва» как ядерных частиц, так и электронов, дало основание назвать потоки возникающих при взрыве частиц электронно-ядерными ливнями. На рис. XXXIX в конце книги приведена фотография такого ливня, полученная в камере Вильсона.

ГЛАВА IX

НЕЙТРИНО

Бета-спектры

В настоящей главе мы коснёмся одного из самых сложных и запутанных вопросов ядерной физики. Речь идёт о природе бета-спектров.

Ещё в период раннего изучения радиоактивных веществ учёные стремились измерить энергию частиц, излучаемых в процессе радиоактивного распада. Путём тщательной и кропотливой работы, применяя известный уже читателю метод отклонения частиц в магнитном и электрическом полях, удалось измерить и массу излучаемой частицы и её энергию. Такие исследования были произведены для всех радиоактивных излучателей. При этом и обнаружилось коренное различие между веществами, излучающими альфа- и бета-лучи.

Выяснилось, что каждое вещество, испускающее при радиоактивном распаде альфа-лучи, излучает альфа-частицы вполне определённой энергии, свойственной только данному веществу. Альфа-частицы, испущенные различными радиоактивными веществами, имеют различную энергию. В настоящее время энергия альфа-частиц измерена у всех радиоактивных альфа-излучателей, и мы можем устанавливать природу радиоактивного вещества по энергии его альфа-частиц. Пользуясь известными нам закономерностями альфа-распада, мы можем даже предсказать, какова должна быть энергия альфа-частиц у ещё неизвестных, не обнаруженных в природе радиоактивных веществ.

По-иному ведут себя радиоактивные вещества, излучающие бета-частицы. Когда стали измерять энергию электронов, вылетающих в процессе радиоактивного бета-распада, то сразу же заметили, что каждый радиоактивный изотоп

испускает электроны не какой-то одной определённой энергии (как это имеет место для альфа-радиоактивных веществ), а целый набор — спектр электронов самых различных энергий, начиная от нуля и кончая некоторым предельным значением. Это предельное значение энергии, названное границей бета-спектра, является характерной величиной для каждого бета-излучателя. Для примера на рис. 46 приведён бета-спектр, возникающий при распаде радия Е.

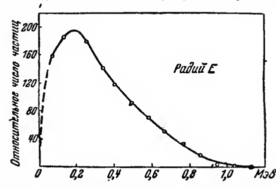


Рис. 46. Бета-спектр электронов, испускаемых радием Е. По оси абсцисс отложена энергия в миллионах электрон-вольт; по оси ординат — количество электронов в условных единицах.

Когда стал известен этот удивительный результат, возникла необходимость разобраться в природе странного характера бета-спектров. Однородность энергии альфа-частиц, испускаемых при альфа-распаде, не вызывала удивление. Это обстоятельство казалось естественным, более того, обязательным. В самом деле, ведь в ядрах всякого радиоактивного вещества имеется некоторый избыток энергии, который и выделяется при радиоактивном распаде. Но все атомные ядра данного радиоактивного изотопа одинаковы. Поэтому и избыток энергии у всех ядер данного изотопа тоже должен быть одинаков. Естественно, что альфа-частицы, уносящие этот избыток энергии, должны иметь одну и ту же энергию. Повторяем, это обстоятельство не казалось удивительным, оно принималось как должное. Зато удивительным было поведение бета-излучателей. Почему бета-

частицы, возникающие при бета-распаде, имеют различную энергию? Почему энергетический спектр этих частиц выражается непрерывной кривой, идущей от нулевой энергии до некоторого предельного значения?

Мы знаем, что каждый отдельный электрон, который мы наблюдаем, возникает в результате превращения какого-то одного ядра данного вещества. Но ведь все ядра одного и того же изотопа одинаковы. Обычно перед каждым бета-распадом происходит один или несколько альфа-распадов, в процессе которых вылетают альфа-частицы одинаковой энергии, что может служить иллюстрацией тождественности всех ядер данного радиоактивного изотопа. Часто и после бета-превращения происходит альфа-превращение. Альфа-частицы, возникающие в процессе этих последующих превращений, также имеют вполне определённую энергию. Это обстоятельство подтверждает, что энергия различных ядер до бета превращения и после бета-превращения одинакова.

В чём же тогда причина непрерывного спектра бета-лучей? Ведь если все ядра исходного радиоактивного вещества имеют одинаковую энергию и все ядра образующегося вещества также имеют одинаковую энергию, то казалось бы, что энергия электронов, испускаемых в процессе бета-распада, должна быть одинаковой у всех электронов, так же, как это имеет место для альфа-частиц. Между тем она оказывается различной: бета-лучи обладают не одинаковой энергией, а непрерывным спектром энергий, правда, со вполне определённым верхним пределом.

Наличие верхнего предела непрерывного спектра дало возможность высказать следующие предположения о причине его возникновения.

Возможно, что все электроны, вылетающие из ядра, обладают в момент вылета одинаковой энергией, равной энергии границы спектра, но, может быть, в дальнейшем не все электроны сохраняют свою энергию. Известно ведь, что быстрые электроны могут терять свою энергию на образование излучения. Не могут ли они по-разному терять свою энергию по дороге от источника до места наблюдения?

Некоторыми учёными выдвигалось предположение, что не всегда избыток энергии, имеющейся в ядрах, целиком передаётся электронам. Может быть, часть энергии выделяется из ядра в виде гамма-лучей? Может быть, в одних

ядрах бо́льшая часть энергии переходит к электронам, а в других — к гамма-лучам? Это также могло быть причиной различия в энергиях электронов. Правдоподобность этого предположения, казалось, находила подтверждение в том хорошо известном факте, что бета-излучение часто сопровождается гамма-излучением, в то время как при альфа-распаде гамма-лучи обнаруживаются крайне редко.

Исследованием этого явления занялись Эллис и Вустер. Они решили прежде всего проверить основной факт — забирают ли электроны всю энергию, освобождающуюся при бета-распаде, или часть этой энергии выделяется в виде какого-либо иного излучения. При этом они рассуждали так: мы знаем, сколько электронов испускается в единицу времени данным радиоактивным веществом; мы можем измерить, сколько электронов обладает тем или другим значением энергии, т. е. определить спектр бета-частиц. Зная число электронов и их энергии, мы можем вычислить сумму этих энергий, т. е. определить энергию всех электронов, испускаемых исследуемым веществом в одну секунду.

Так как электронов, обладающих энергией, равной или близкой к границе спектра, очень мало, то полная энергия электронов будет значительно меньше произведения числа электронов на предельное значение их энергии. В действительности полная энергия электронов будет равняться произведению их числа на некоторое среднее значение энергии.

Следуя рассуждениям Эллиса и Вустера, мы можем сказать, что, зная спектр бета-частиц, мы знаем энергию, уносимую электронами при распаде. Как же определить энергию, выделяемую при распаде?

Окружим радиоактивный излучатель свинцовым фильтром такой толщины, чтобы всё рентгеновское излучение и все гамма-лучи поглотились в этом экране. Само собой разумеется, что и все электроны также поглотятся в этом фильтре; следовательно, фильтр поглотит всю энергию, выделяемую радиоактивным веществом при бета-распаде. Как же измерить величину этой энергии? — А вот как: поглощённая в свинце энергия вызовет его нагревание, повысит его температуру. По степени увеличения температуры можно вычислить поглощённую в свинце энергию, т.е. полную энергию, выделенную при распаде.

Итак, измеряя спектр электронов (и число их, испускаемое радиоактивным веществом), мы определяем энергию, уносимую электронами, а измеряя температуру свинцового фильтра, мы определим всю энергию, выделившуюся при распаде. Сравнивая эти две величины, мы и сможем ответить на вопрос, вся ли энергия распада выделяется в виде энергии электронов или часть её идёт куда-нибудь ещё.

Однако решить поставленную задачу было не так-то просто. Энергия, выделяемая при распаде, сравнительно невелика и толстый свинцовый фильтр нагревается незначительно. Чтобы избежать возможных ошибок, Эллис и Вустер приготовили два совершенно одинаковых калориметра, в один из которых они вложили радиоактивный излучатель, а другой оставался пустым. Сравнивая температуру обоих калориметров, они смогли довольно точно определить энергию, выделяемую радиоактивным веществом. В их опытах в качестве радиоактивного излучателя был взят радий Е. Бета-спектр радия Е (см. рис. 46) был хорошо изучен самими Эллисом и Вустером. Они установили, что граница бета-спектра радия Е равна 1,05 миллиона электрон-вольт. Была измерена также и средняя энергия электронов, испускаемых радием Е. Она оказалась равной 0,39 миллиона электрон-вольт. Наконец, были закончены и тепловые измерения с калориметром. Результат их не только не объяснил тайны природы бета-спектра, но, наоборот, сделал этот вопрос ещё более запутанным. Измерения со свинцовым калориметром показали, что радий Е испускает в среднем на один распад энергию, равную 0,35 миллиона электрон-вольт. Учитывая неизбежные ошибки в столь деликатных измерениях, приходилось признать это число хорошо совпадающим со средним значением энергии электронов (0,39).

Итак, *энергия, уносимая электронами, представляет собой всю энергию, выделяемую при бета-распаде*. В чём же тогда причина непрерывности бета-спектров? Этот вопрос оказался труднейшей проблемой.

Трудности, связанные с решением этой задачи, были столь велики, что некоторые учёные стали сомневаться даже в справедливости закона сохранения энергии. Так, Бор выдвинул гипотезу о нарушении закона сохранения энергии при бета-распаде.

По мнению Бора было несомненным, что все ядра бета-излучателя тождественны, так же как тождественны и ядра вещества, образующегося в процессе распада. Избыток энергии, образующийся в результате радиоактивного превращения, всегда один и тот же. В случае перехода радия E в радий F этот избыток равен 1,05 миллиона электрон-вольт. Однако, рассуждает далее Бор, электрон не всегда получает эту энергию. Иногда он получает эту энергию полностью, а иногда только частично. Что же делается с остальной частью энергии? Она исчезает бесследно. Закон сохранения энергии при бета-распаде, по мнению Бора, не соблюдается.

Однако рассуждения Бора противоречили основам физики. Ведь закон сохранения энергии является тем фундаментом, на котором зиждется любая физическая теория. Достаточно напомнить хотя бы закон излучения квантов света, сформулированный самим же Бором. Он представляет собой не что иное, как закон сохранения энергии в применении к электронной оболочке атома и к излучению; именно, атом излучает квант электромагнитной энергии, величина которого равна уменьшению внутренней энергии атома, переходящего при этом на более низкий энергетический уровень. В конце концов бо́льшая часть наших предшествующих заключений о ядре и элементарных частицах покоится на законе сохранения энергии.

Гипотеза Паули

Выход из затруднения указал немецкий физик Паули. Он считал, что закон сохранения энергии должен соблюдаться и при бета-распаде, так же как он соблюдается во всех других явлениях. Если это так, то все распадающиеся ядра должны выделять одну и ту же энергию. Однако электроны имеют самую различную энергию. Значит, энергию, выделяющуюся при распаде, забирают не только электроны. Очевидно, должна существовать ещё какая-то частица, которая уносит с собой часть энергии, выделяющейся при бета-распаде. Таким образом, по мнению Паули, при бета-распаде из ядра вылетает не одна частица — электрон, а две: электрон и какая-то частица, которая ещё не была обнаружена. Вся энергия распределяется между ними. В некоторых случаях обе частицы получают энергию поровну, в

других случаях электрон получает энергию бо́льшую, а другая частица поменьше. В некоторых случаях электрон забирает всю энергию. Как раз такому случаю отвечает граница спектра. Конечно, бывают и такие случаи, когда эта неизвестная частица забирает с собой всю или почти всю энергию бета-распада. Таких случаев относительно много, поэтому средняя энергия электрона не равна половине граничной энергии спектра, а несколько меньше.

Гипотеза Паули устраняла противоречие с законом сохранения энергии. Однако нужно было эту гипотезу согласовать ещё с результатами опытов Эллиса и Вустера. Ведь эти опыты, предпринятые специально для проверки предположения о том, что электроны забирают только часть энергии распада, казалось, однозначно свидетельствовали против такого предположения. По данным Эллиса и Вустера получалось, что толстые свинцовые фильтры поглощают столько энергии, сколько её было у электронов и не больше. Ну, что ж, решил Паули, это значит только, что новая частица, о которой идёт речь, вовсе не поглощается свинцом или поглощается столь незначительно, что это поглощение не проявилось в опытах Эллиса и Вустера.

Что же это за частица и каких свойств можно у неё ожидать?

Сразу же можно было утверждать, что эта частица не имеет заряда, ибо иначе она легко могла бы быть обнаружена в опытах по отклонению в электрическом или магнитном полях. Да и кроме того, заряженная частица с энергией порядка одного миллиона электрон-вольт не смогла бы пройти через толстый свинцовый фильтр. Следовательно, частицы Паули не могут быть заряженными — они нейтральны. С одной нейтральной частицей мы уже знакомы — это нейтрон. Однако легко сообразить, что нейтрон не может быть той частицей, существование которой предположил Паули. Во-первых, нейтроны, хотя и не очень сильно, но всё же поглощаются свинцовым фильтром. Во-вторых, выделение из ядра при бета-распаде, кроме электронов, ещё и нейтронов могло бы легко обнаружиться по изменению массы ядер (нейтрон, уходя из ядра, уносит с собой массу, равную единице). Наконец, нейтрон, если только это был он, должен был обнаружить себя по столкновениям с другими атомными ядрами. Таких столкновений, однако, не наблю-

далось. Очевидно, нейтрон не мог быть частицей Паули. Не оставалось ничего иного, как предположить, что частица, выделяющаяся при бета-распаде вместе с электроном, является совершенно новой, не наблюдавшейся до тех пор ни в каких других физических явлениях.

Паули предположил, что она имеет массу, равную массе электрона, и назвал эту частицу «*нейтрино*» (уменьшительное от слова нейтрон на итальянском языке). Так родился нейтрино.

Рождение нейтрино не сопровождалось «торжественным колокольным звоном». Существование нейтрино не было подтверждено такими неоспоримыми фактами, какими было установлено существование нейтронов, позитронов, мезонов, гиперонов. В сущности, никаких физических данных, подтверждающих реальность существования нейтрино, за исключением факта непрерывности бета-спектра, не было. Более того, пришлось наделить нейтрино такими свойствами, что казалось весьма сомнительным, чтобы вообще в каком-либо физическом опыте такая частица могла быть обнаружена.

Все знания о нейтрино имеют отрицательный характер. Мы знаем, что оно не имеет заряда, не обладает магнитными свойствами, не взаимодействует с ядрами и электронами, не сталкивается с ними или, если и сталкивается, то не передаёт им заметной энергии. Были произведены опыты, показавшие, что если нейтрино и существуют, то они ионизируют так слабо, что в воздухе на пути в 500 000 *км* каждое из них может создать не более одной пары ионов; не удивительно поэтому, что многие физики отнеслись весьма скептически к предложенной Паули частице. И действительно, трудно было поверить в реальность существования нейтрино.

Однако гипотеза о нейтрино всё же указывала на возможность выхода из тупика, возникшего в результате установления непрерывного характера бета-спектра. Поэтому поиски данных, свидетельствующих о реальности существования нейтрино, продолжались.

В 1934 г. Ферми на основе представлений Паули о нейтрино разработал теорию, которая объяснила многие детали и особенности бета-спектров. В 1935 г. советский учёный А. И. Лейпунский придумал опыт, в котором могло бы

проявиться существование нейтрино. Лейпунский рассуждал так.

При бета-распаде из ядра выбрасываются новые частицы. Следовательно, должно иметь место явление, аналогичное отдаче при выстреле. Подобно тому, как пушка при выстреле откатывается назад, при бета-распаде (так же, впрочем, как и при других видах распада) должна иметь место *отдача ядра*. Ядро, испустившее частицу, должно получить толчок в направлении, противоположном движению вылетевшей частицы. Очевидно, что отдача, испытываемая ядром при бета-распаде, будет различной в зависимости от того, вылетает из ядра одна частица — электрон — или две частицы — электрон и нейтрино.

Согласно гипотезы Паули избыточная энергия ядра передаётся при бета-распаде электрону и нейтрино. В случае распада радия Е электрон получает в среднем всего лишь 0,39 миллиона электрон-вольт, а остальную часть, равную 0,66 миллиона электрон-вольт, забирает нейтрино. Очевидно, что ядро будет испытывать значительно большую «отдачу», если из него одновременно вылетает нейтрино с энергией 0,66 миллиона электрон-вольт и электрон с энергией 0,39 миллиона электрон-вольт, чем в случае вылета одного электрона с энергией 0,39 миллиона электрон-вольт. Идея Лейпунского и заключалась в том, чтобы (коль скоро нельзя обнаружить нейтрино по взаимодействию их с веществом) попытаться найти данные, подтверждающие возникновение их в процессе бета-распада путём изучения отдачи ядер. Однако осуществление этой идеи в 1935 г. было делом чрезвычайно сложным, и самому Лейпунскому не удалось получить вполне однозначные результаты. Значительно позже, в 1942 г., Аллен в несколько изменённой форме повторил опыт, предложенный Лейпунским. Прежде чем перейти к описанию опытов Аллена, мы расскажем здесь ещё об одном интересном явлении.

K-захват

В 1935 г. Моллер обратил внимание на то, что радиоактивные вещества, испускающие в процессе распада позитроны, могли бы испытывать ещё и другое превращение. В самом деле, например, ядро $^{48}_{23}V^*$, испускающее позитроны

и испытывающее превращение согласно схеме

$$^{48}_{23}V^* \rightarrow {}^{48}_{22}Ti + {}^{0}_{+1}e \text{ (позитрон)},$$

превращается в $^{48}_{22}Ti$. Однако изотоп $^{48}_{23}V^*$ мог бы превратиться в $^{48}_{22}Ti$ не только путём испускания позитрона. Для этого достаточно было ядру $^{48}_{23}V^*$ захватить один из электронов, находящийся в оболочке его атома. В этом случае масса ядра останется такой же, а заряд уменьшится на единицу, так же как это имеет место и при позитронном распаде.

Схема такого превращения должна быть записана следующим образом:

$$^{48}_{23}V^* + {}^{0}_{-1}e \text{ (электрон)} \rightarrow {}^{48}_{22}Ti.$$

Захват орбитального электрона ядром атома должен протекать по тем же законам, что и радиоактивный распад. Такой процесс можно количественно характеризовать некоторой «постоянной захвата», аналогичной величине λ— постоянной радиоактивного распада. Можно ввести понятие «периода полузахвата» (аналогичное понятию «периода полураспада»), означающее время, в течение которого в половине имеющихся атомов осуществится захват ядром одного из орбитальных электронов.

Итак, с радиоактивными ядрами типа $^{48}_{23}V$, претерпевающими позитронный бета-распад, могут происходить два радиоактивных процесса. Вопрос о том, какой из них имеет преимущественный характер, определяется соотношением постоянных захвата и распада. Если постоянная распада значительно больше постоянной захвата, то распад будет происходить чаще захвата; если же постоянная радиоактивного распада будет меньше постоянной захвата — чаще будет происходить превращение ядер, вызванное захватом электрона.

Каким же образом можно обнаружить процесс захвата атомным ядром орбитального электрона? Обычные приёмы, применяемые для изучения радиоактивности, в данном случае не пригодны. В самом деле, при радиоактивных превращениях из ядра вылетает какая-либо частица. Регистрируя такую частицу, мы, собственно, и судим о том, что произошёл радиоактивный распад. В случае же захвата яд-

ром орбитального электрона вылет частиц из ядра не происходит. Поэтому мы не можем судить о радиоактивном захвате по появлению каких-либо новых частиц.

Способ обнаружения захвата электрона был указан Альварецом. Чтобы понять идею Альвареца, вспомним, что в атомах электроны распределяются по орбитам. Два электрона, образующие так называемую *К*-оболочку, расположены наиболее близко к ядру. Поэтому естественно ожидать, что ядром будут захватываться преимущественно электроны именно этой группы.

Допустим, что именно такой захват произошёл. Что случится после этого?

Ядро ванадия, захватившее один электрон, превратится в ядро титана. Заряд ядра титана будет на одну единицу меньше, чем заряд ядра ванадия. Нормально в оболочке атома титана должно содержаться двадцать два электрона, ибо заряд ядра титана равен 22. В оболочке атома ванадия было двадцать три электрона, один из них захватился ядром, осталось, следовательно, 22, т. е., казалось бы, столько, сколько нужно. Однако если ядро ванадия при превращении захватило электрон из *К*-группы — этот случай специально так и называют *К*-захват,— то электроны в образующемся атоме титана будут распределены неправильно. В группе *К* будет только один электрон, а их должно быть два. Зато среди наружных валентных электронов один будет лишний, ибо у ванадия пять валентных электронов, а у титана их должно быть только четыре. Итак, в атоме титана, образующемся вследствие превращения ванадия, будет лишний валентный электрон и не будет одного электрона в группе *К*. Лишний валентный электрон перейдёт в конце концов в *К*-группу. При этом, как известно, будут испускаться характерные для титана рентгеновские лучи. По появлению у ванадия рентгеновских лучей титана мы и можем судить о том, что произошёл захват ядром *К*-электрона.

При *К*-захвате атомы данного элемента испускают рентгеновские лучи, характерные для элемента, расположенного в таблице Менделеева на одну клетку раньше исходного. Атомы ванадия, захватившие *К*-электрон, будут испускать рентгеновские лучи, присущие титану. Однако рентгеновское излучение титана должно испускаться

не только при K-захвате, но и при позитронном распаде ванадия *).

Как же отличить рентгеновские лучи титана, возникшие в результате K-захвата, от лучей, возникших в результате бета-распада? Энергии этих лучей совершенно одинаковы. Однако если сравнить число квантов рентгеновского излучения титана, возникающих при превращении ванадия, с числом позитронов, можно установить, происходит ли K-захват. Ведь позитроны возникают только при распаде ванадия, а кванты рентгеновского излучения титана появляются как при позитронном распаде, так и при K-захвате. Если окажется, что число позитронов, испускаемых ванадием, равно или больше числа рентгеновских квантов, то, очевидно, никакого K-захвата не происходит. Если же число рентгеновских квантов будет больше числа позитронов, то, несомненно, наряду с бета-распадом происходит и K-захват.

Такой путь обнаружения K-захвата и избрал Альварец. Он установил, что число позитронов распада у ванадия в два раза меньше числа квантов рентгеновского излучения титана и пришёл к выводу, что у ванадия имеет место K-захват, вероятность которого совпадает с вероятностью бета-распада.

Как только стали известны результаты работы Альвареца, многие учёные устремились проверять, как обстоит дело в случае других ядерных превращений, совершающихся с испусканием позитронов.

Во многих случаях удалось установить наличие K-захвата. Ядра кальция 41, скандия 46, хрома 51, марганца 52 и 54, кобальта 56 и 57, меди 61 и 64 и многие другие превращаются путём K-захвата. Около сорока различных превращений, совершающихся путём K-захвата, зарегистрировано в настоящее время. Среди этих различных превращений существуют и такие, у которых (как и у ванадия 48) превращение путём K-захвата приблизительно одинаково вероятно с превращением, совершающимся с вылетом позитрона. Однако у некоторых веществ преобладают превращения, совершающиеся путём испускания позитронов. У других, напротив, преобладает K-захват.

*) Если при этом распаде возникают гамма-лучи, то часть их может выбивать электроны из K-оболочки, создавая аналогичное рентгеновское излучение.

Особенно интересным оказалось превращение ядра бериллия 7.

Бериллий 7 является радиоактивным изотопом одного из самых лёгких элементов. У лёгких элементов изотопов очень мало, поэтому сразу же можно предсказать, каково должно быть превращение этого ядра.

Устойчивый изотоп с массой семь имеется лишь у лития. Литий имеет атомный номер, на единицу меньший, чем у бериллия. Поэтому следовало ожидать, что превращение радиоактивного ядра бериллия 7 в устойчивое ядро лития 7 будет совершаться путём *К*-захвата либо путём испускания позитронов. Однако предпринятые поиски показали, что бериллий 7 позитронов не испускает вовсе. Это позволяло думать, что ядра бериллия 7 все превращаются путём *К*-захвата. Но как обнаружить *К*-захват у бериллия?

Так как образующийся при *К*-захвате бериллия элемент литий имеет ядро с малым зарядом, равным всего трём единицам, то возникающие при этом захвате рентгеновские лучи состоят из квантов столь небольшой энергии, что обнаружить их не представляется возможным. Помог случай, благодаря которому было обнаружено, что бериллий 7 радиоактивен и превращается в устойчивый изотоп лития действительно путём *К*-захвата.

Ещё ранее было замечено, что когда в результате ядерных превращений образуется устойчивый изотоп лития — литий 7, то часть образующихся ядер, составляющая примерно десять процентов от общего числа, оказывается в возбуждённом состоянии, причём они имеют избыток энергии, равный 0,45 миллиона электрон-вольт. Этот избыток энергии, как всегда в таких случаях, излучается ядром в виде кванта гамма-лучей. Возникновение ядер лития 7 по счастливой случайности сопровождается своеобразным сигналом — испусканием гамма-квантов с энергией 0,45 миллиона электрон-вольт. Это и помогло установить, что бериллий радиоактивен.

Бериллий 7 образуется, например, при бомбардировке лития 6 дейтронами:

$$^{6}_{3}\mathrm{Li} + ^{2}_{1}\mathrm{D} \rightarrow ^{7}_{4}\mathrm{Be} + ^{1}_{0}n.$$

Оказалось, что испускание гамма-лучей с энергией 0,45 миллиона электрон-вольт происходит и после прекраще-

ния бомбардировки лития 6 дейтронами. Интенсивность гамма-излучения падает со временем точно так же, как и у других радиоактивных веществ. За 43 дня интенсивность гамма-излучения уменьшается наполовину.

Химическим путём было установлено, что это излучение связано именно с бериллием, образовавшимся при бомбардировке лития дейтронами. Следовательно, бериллий 7 радиоактивен и превращается в литий 7, часть ядер которого возникает в возбуждённом состоянии, вследствие чего и появляются гамма-лучи с энергией 0,45 миллиона электрон-вольт. Период полураспада бериллия 7 равен 43 дням. Так как превращение бериллия 7 в литий 7 не сопровождается испусканием позитронов, оно может быть осуществлено только путём K-захвата.

Итак, бериллий 7 оказался радиоактивным и превращается в литий 7 *только путём K-захвата*. Это обстоятельство сыграло важную роль в решении вопроса о том, является ли реальным существование нейтрино. Какое же отношение имеет бериллий 7 к нейтрино? Ведь предположение о существовании нейтрино возникло из необходимости понять непрерывный характер бета-спектра. Именно это и заставило Паули высказать гипотезу о том, что нейтрино сопровождает электрон, появляющийся при бета-распаде. Изучение спектра позитронов, появляющихся при позитронном распаде, показало, что этот спектр имеет такой же характер, как и спектр электронов при бета-распаде. Следовательно, при излучении позитрона должен также появляться нейтрино.

Однако при превращении бериллия 7 позитроны не возникают. Тем не менее и в этом случае можно ожидать появления нейтрино по тем же самым причинам, по которым имеет место возникновение нейтрино при бета-распаде. Это прежде всего — результат действия закона сохранения энергии. Ведь запас энергии у ядра бериллия 7 отличен от того, что имеет нормальное ядро лития 7. При превращении

$$^{7}_{4}\mathrm{Be}^{*} + {}^{0}_{-1}e \rightarrow {}^{7}_{3}\mathrm{Li}$$

должна выделиться энергия в количестве 0,8 миллиона электрон-вольт. Каким же образом эта энергия выделяется? Ведь при этом превращении частицы из ядра не вылетают. Следовательно, они не могут унести с собой избыток энер-

гии. Гамма-лучи также при этом не возникают. Те гамма-лучи с энергией 0,45 миллиона электрон-вольт, о которых мы упоминали, возникают у ядра лития после того, как совершилось превращение бериллия, а самый процесс превращения бериллия 7 в литий 7 не сопровождается испусканием гамма-лучей.

Итак, при превращении бериллия 7 в литий 7 не возникает ни гамма-квантов, ни позитронов. Каким же образом тогда из ядра лития 7, возникающего при этом превращении, удаляется избыток энергии? Приходится допустить, что существует какая-то нейтральная частица, которую мы не замечаем, но которая и забирает с собой этот избыток в виде своей кинетической энергии, т. е. мы опять приходим к гипотезе о нейтрино. Однако здесь дело обстоит несколько иначе. Ведь из ядра бериллия вылетает только одна частица — нейтрино. Следовательно, если ядро бериллия получит отдачу, то эта отдача обусловлена именно нейтрино, а не чем-нибудь другим. Если бы удалось такую отдачу обнаружить, это было бы новым аргументом в пользу гипотезы о существовании нейтрино.

Надо сказать, что превращение бериллия 7 в литий 7 является самым удобным случаем для обнаружения существования отдачи ядер. Действительно, масса бериллия 7 невелика. Бериллий 7 является одним из самых лёгких изотопов. Это очень важно, ибо чем легче будет ядро, тем больше будет величина испытываемой им отдачи. Далее, так как из ядра, кроме нейтрино, ничего больше не вылетает, то все ядра должны испытывать одинаковую отдачу. Эти особенности играют существенную роль для успешного осуществления опытов по отдаче ядер.

Замечательные свойства бериллия 7 раньше других были поняты советским учёным А. И. Алихановым, который в 1939 г. начал свои очень интересные опыты по наблюдению отдачи ядер. Война помешала Алиханову закончить эти исследования.

Опыт Аллена

В 1942 г. Аллен осуществил следующий опыт (рис. 47).

Тонкая плёнка бериллия 7 наносилась на пластинку *A*. Очень важно было получить бериллий в виде одноатомного слоя на этой поверхности. Эта трудная задача была решена

Алленом. Энергия ядер отдачи, получающихся при испускании бериллием нейтрино, невелика. Она равна всего лишь 80 электрон-вольтам. Ядро, получившее такую отдачу, вылетает в виде иона. Чтобы этот ион мог благополучно дойти до места наблюдения, нужно было тщательно обезгазить саму пластинку, на которую был нанесён бериллий 7, и, кроме того, создать по возможности лучшее разрежение в том приборе, в котором эти ионы должны двигаться. Чтобы иметь благоприятные условия для удаления ионов отдачи с поверхности пластинки, Аллен поместил перед ней сетку B, создав между этой сеткой и пластинкой A электрическое поле, ускоряющее положительные ионы. Действие этой сетки на ионы аналогично действию управляющей сетки в усилительной радиолампе. Наличие её позволяет вытягивать электроны из катода лампы. Также и в опытах Аллена наличие сетки B облегчало вытягивание ионов лития 7, возникающих вследствие отдачи на пластинке A.

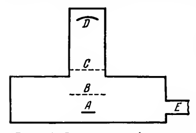


Рис. 47. Схема опыта Аллена. A — пластинка с радиоактивным источником $^7_4$Be; B и C — сетки; D — приёмный электрод счётчика ионов; E — трубка к вакуумному насосу.

Когда ядра отдачи проходили электрическое поле между пластинкой A и сеткой B, то их энергия увеличивалась за счёт электрического поля. В опытах Аллена это увеличение энергии составляло приблизительно 100 электрон-вольт. Пройдя сетку B, ионы попадали в новое электрическое поле, заключённое между сетками B и C. Электрическое поле здесь было направлено так, что ионы, прошедшие сетку B, тормозились полем. Меняя величину поля BC, можно было сделать её такой, чтобы все ионы, прошедшие сетку B, не смогли дойти до сетки C. Для этого поле BC должно быть таким, чтобы ион потерял в нём не только энергию, приобретённую в электрическом поле AB, но и ту энергию, которую он получил при отдаче.

Если, однако, мы возьмём поле BC меньшим, чем указанное выше значение, то ядра отдачи будут проходить через сетку C. Здесь они попадают в ускоряющее электри-

ческое поле величиной в несколько тысяч вольт, после чего улавливаются специальным счётчиком, помещённым в D.

Итак, по регистрации ионов счётчиком D можно было судить, проходят ли какие-либо заряженные частицы поле BC или нет. Опыт показал, что ядра отдачи действительно существуют и что энергия их равна 80 электрон-вольтам, т. е. полностью совпадает с той величиной, которую можно было ожидать, если отдача действительно обязана нейтрино.

Чтобы окончательно устранить возможные сомнения в том, что отдача вызвана не нейтрино, а например, гамма-лучами, Аллен произвёл контрольные опыты. При этом он рассуждал так: если отдача происходит вследствие вылета гамма-кванта, то тогда ядра отдачи должны появляться одновременно с гамма-квантами. Но ведь гамма-квант — не нейтрино. Его мы можем регистрировать счётчиком независимо от ядра отдачи. Следовательно, если мы поставим два счётчика, один из которых будет предназначен для счёта гамма-квантов, а другой — для счёта ядер отдачи, мы должны будем наблюдать совпадающие отсчёты обоих счётчиков. Однако ничего подобного не было обнаружено. Это давало основание заключить, что появление ядер отдачи вызвано не гамма-лучами.

Итак, в процессе превращения бериллия 7 в литий 7, совершающемся путём K-захвата, ядра лития 7 испытывают отдачу. Импульс, соответствующий этой отдаче, очевидно, уносится какой-то частицей. Это обстоятельство делает гипотезу о существовании нейтрино — частицы, лишённой электрического заряда и магнитного момента и обладающей массой, не большей, чем масса электрона, весьма вероятной.

Тщательное исследование бета-спектра ${}^{3}_{1}H$ (тритона) показало, что масса нейтрино в действительности значительно меньше массы электрона. Точное значение массы нейтрино определить не удалось, однако можно было с несомненностью утверждать, что она не превосходит $\frac{1}{1000}$ массы электрона.

ГЛАВА X

О СТРОЕНИИ АТОМНЫХ ЯДЕР И О СИЛАХ, ДЕЙСТВУЮЩИХ МЕЖДУ ЯДЕРНЫМИ ЧАСТИЦАМИ

Мы уже ознакомились со многими явлениями, происходящими с атомными ядрами, и теперь своевременно поставить вопрос о том, как устроены атомные ядра, из каких частиц они состоят, какие силы действуют между этими частицами.

Уже упоминалось, что ранее, когда были известны только явления, связанные с естественной радиоактивностью, считалось, что атомные ядра состоят из альфа-частиц, протонов и электронов. С тех пор мы узнали, что существуют другие элементарные частицы — нейтроны, позитроны, мезоны, нейтрино. Все эти частицы играют ту или иную роль в явлениях, совершающихся с атомными ядрами. При ядерных превращениях мы наблюдали нейтроны, позитроны и нейтрино, так же как протоны и альфа-частицы. При взаимодействии быстрых протонов и нейтронов с атомными ядрами наблюдается появление π-мезонов. Входят ли все перечисленные частицы в состав атомных ядер? Оказывается, что нет.

Есть ли электроны в атомных ядрах?

Прежде всего о гипотезе, что ядра состоят из протонов и электронов. Эта гипотеза приводит к целому ряду противоречий с опытом. Вот некоторые из них.

1. *Магнитные свойства атомных ядер.* Возьмём такое простейшее ядро, как дейтрон. Масса его равна двум, заряд — единице. По рассматриваемой гипотезе дейтрон должен был бы состоять из двух протонов и одного электрона. И протон и электрон обладают магнит-

ными свойствами. Магнитные свойства частиц принято характеризовать величиной, которая носит название магнитного момента.

Магнитные моменты протона и электрона не одинаковы: момент протона почти в тысячу раз меньше, чем момент электрона. Если правильна гипотеза, что дейтрон состоит из двух протонов и одного электрона, то какое значение магнитного момента нужно было бы ожидать у дейтрона? Ответ, конечно, прост. Поскольку магнитные моменты протонов малы по сравнению с магнитным моментом электрона, то следовало бы ожидать, что магнитный момент дейтрона будет иметь величину, близкую к магнитному моменту электрона. Однако опыт показывает, что ничего подобного нет. Магнитный момент дейтрона оказался меньше, чем магнитный момент протона!

Возникает законный вопрос — если электрон действительно находится в ядре дейтрона, то почему исчезло связанное с ним магнитное поле?

Ядро тяжёлого водорода мы выбрали в качестве примера. В действительности отмечаемое противоречие относится ко всем ядрам. Магнитные моменты всех ядер малы по сравнению с магнитным моментом электрона.

2) «С п и н» я д е р. Поясним, что понимается под термином «спин». Каждый хорошо знает детскую игрушку, называемую «волчком». Волчок — это тело, способное быстро вращаться вокруг своей оси. Вращательное движение характеризуется величиной, которая носит название вращательного момента. Всякое вращающееся тело обладает определённым вращательным моментом. Оказывается, что все элементарные частицы: и электрон, и протон, и позитрон, нейтрон и нейтрино, также обладают вращательным моментом. Было бы неверно думать, что мельчайшие частицы действительно являются «миниатюрными волчками», т. е. маленькими твёрдыми тельцами, вращающимися вокруг оси. Уже одно то обстоятельство, что они способны к превращениям, т. е. могут возникать и исчезать, превращаясь в иные частицы, доказывает, что они — гораздо более сложные объекты. Однако вращательным моментом, природа которого до сих пор ещё не установлена окончательно, они обладают, причём в отличие от волчка, вращательный момент которого вследствие трения о поверхность, по которой он

движется, всё время уменьшается, вращательный момент протона и электрона остаётся всегда неизменным.

Наличие вращательного момента является столь же характерной особенностью элементарных частиц, как и их заряд. Для вращательного момента поэтому было придумано специальное название «спин» (от английского слова «spin», что соответствует термину «веретено»). Величину спина выражают в особых единицах (эта единица равна постоянной Планка h, делённой на 2π). В этих единицах спин протона и спин электрона выражаются числом $\frac{1}{2}$.

Если две какие-либо частицы, каждая из которых имеет спин, равный половине, соединяются вместе, то образующаяся сложная система будет иметь спин, равный или нулю, или единице. Спины складываются и дают результирующее значение, равное единице тогда, когда направления вращательных моментов обеих частиц будут одинаковы. Если же направления вращательных моментов будут противоположны, то значение спина всей системы будет равно разности спинов обеих частиц, т. е. нулю. Эти правила сложения спинов позволяют легко предсказать величину спина ядра, если только известно число частиц, его образующих. Именно, если число частиц чётное, то спин будет либо равен нулю, либо целому числу. Если же число частиц нечётное, то результирующий спин будет равен либо $\frac{1}{2}$, либо $\frac{3}{2}$, либо другому нечётному числу половин.

Различие между обоими случаями весьма большое. Поведение частиц, имеющих целочисленный спин, резко отличается от поведения частиц, имеющих спин, равный нечётному числу половин, поэтому на опыте легко различить оба случая.

Применим это правило к атомным ядрам. Возьмём опять для примера дейтрон. По рассматриваемой гипотезе дейтрон состоит из трёх частиц, поэтому спин его должен быть либо $\frac{1}{2}$, либо $\frac{3}{2}$. Между тем на опыте было установлено, что спин дейтрона равен единице. Такое же противоречие было установлено для ядра азота. Масса ядра азота равна четырнадцати массовым единицам. Следовательно, в нём — 14 протонов. Атомный номер азота равен семи, следователь-

но, в ядре азота должно быть ещё семь электронов, а всего $14 + 7 = 21$ частица.

Если число частиц нечётное, то спин будет равен нечётному числу половин. Однако точные спектральные исследования показали, что спин азота — целочисленный. Это обстоятельство представлялось настолько противоречивым, что вошло в историю науки под названием «азотная катастрофа».

3) Энергия электронов в ядре. К числу указанных противоречий, связанных с представлением о том, что электроны находятся в атомных ядрах, можно прибавить ещё одно.

Развитие атомной физики привело к созданию особой теории — «волновой механики»,— которая очень хорошо описывает явления «микромира» — мира, связанного с молекулами, атомами и атомными ядрами.

Если воспользоваться правилами, предписываемыми этой теорией, и подсчитать, какова должна быть энергия электрона, если бы он находился внутри ядра (размеры ядра порядка 10^{-13} *см*), то получается огромное число, несовместимое с измеренными на опыте величинами.

Согласно «волновой механике» электроны (а также другие лёгкие частицы — позитроны и нейтрино) не могут находиться внутри атомных ядер. Следовательно, электронов в атомных ядрах не существует. Это значит вместе с тем, что затруднения с магнитными моментами и спинами возникли в результате неправильного предположения о строении ядер.

Если электронов в ядрах нет, то очевидно, что и магнитные моменты ядер не должны быть столь большими, как в случае, если бы электроны находились в ядрах. Очевидно также, что противоречие с величиной спина получалось потому, что мы неправильно подсчитывали число ядерных частиц.

Из чего состоят атомные ядра

Итак, ядра не состоят из протонов и электронов. Однако они несомненно являются сложными образованиями, ибо спин многих ядер целочислен, а, как мы уже отмечали, целочисленность спина — это верный признак наличия сложного образования.

Из каких же всё-таки частиц состоят атомные ядра? Ответ на этот вопрос следующий: *атомные ядра состоят из протонов и нейтронов, а электронов, позитронов и нейтрино в ядрах нет.* Так, например, ядро дейтрона состоит из одного нейтрона и одного протона. Масса такого образования равна двум, заряд — единице, что и соответствует дейтрону $^{2}_{1}D$.

По новой гипотезе в дейтроне находятся только две частицы (чётное число), а не три (как предполагалось ранее), что хорошо согласуется со значением спина дейтрона, равным, как мы указывали, единице.

Ядро азота согласно новому представлению должно состоять из семи протонов и семи нейтронов. Масса ядра азота равна четырнадцати массовым единицам (7 протонов и 7 нейтронов), а атомный номер равен семи (заряд ядра равен семи). И в этом случае новая гипотеза предполагает чётное число частиц в ядре азота, что согласуется со значением его спина.

Мысль о том, что ядра состоят из протонов и нейтронов, впервые высказанная советским учёным Д. Д. Иваненко, хорошо согласуется с известными опытными данными и является в настоящее время общепринятой.

Если заряд ядра равен Z, а массовое число равно A, то в ядре должно находиться Z протонов и $A—Z$ нейтронов, т. е. атомный номер изотопа определяется числом протонов, находящихся в ядре, а массовое число — суммой числа протонов и числа нейтронов.

Итак, ядра состоят из протонов и нейтронов. Конечно, читатель вправе поставить нам следующий вопрос: хорошо, пусть ядра состоят из протонов и нейтронов; но как же быть тогда с электронами и позитронами, появление которых мы наблюдаем как при искусственных ядерных превращениях, так и в превращениях, происходящих с естественными радиоактивными веществами? Откуда возникают эти частицы, если в самих ядрах их нет? Вопрос законный. Ведь очень часто, описывая ядерные превращения, мы говорили о том, что «из ядра вылетают позитроны» или «из ядра вылетают электроны». А теперь оказывается, что в ядрах никаких электронов и позитронов нет.

Действительно, это так. Позитронов и электронов в ядрах нет. Они образуются в пространстве, окружающем ядро,

за счёт избытка энергии, который создаётся в ядре в результате происшедшего с ним превращения.

О том, что позитроны и электроны не являются неизменными образованиями, мы уже знаем. Мы знаем также, что они могут возникать, если только будет затрачена на их образование необходимая энергия. Такая энергия и появляется у ядер при ядерных превращениях.

Электроны и позитроны не существуют в ядрах, а возникают в результате ядерных превращений. В этом смысле испускание позитронов очень похоже на испускание квантов света атомами. Мы отлично знаем, что никаких квантов света внутри атома нет. Однако нас не удивляет, что избыток энергии, имеющейся у возбуждённого атома, переходит в другую форму энергии — в световую энергию. Точно так же нас не должно удивлять и то, что избыток энергии атомного ядра переходит в другую форму энергии — в энергию, связанную с массой электрона.

Что же происходит в самом ядре при возникновении электрона или позитрона. Ведь раньше мы утверждали, что когда из ядра вылетает электрон, заряд ядра увеличивается на единицу, а когда вылетает позитрон — уменьшается на единицу. А это значит, что с появлением позитрона и электрона связаны какие-то процессы, происходящие в ядре. Для выяснения этого вопроса рассмотрим некоторые радиоактивные превращения.

Пример I. «Радиоазот» превращается в изотоп углерод 13. Схема этого превращения следующая:

$$^{13}_{7}N^* \rightarrow {}^{13}_{6}C + {}^{0}_{+1}e \text{ (позитрон)}.$$

Чем отличается первоначальное ядро — радиоазот — от ядра углерода 13, образующегося в результате превращения? Массовое число у обоих ядер одинаково — оно равно тринадцати. Следовательно, общее число протонов и нейтронов в обоих ядрах одно и то же. Однако заряды этих ядер различны. Заряд ядра радиоазота равен семи, а заряд ядра углерода 13 равен шести. Это значит, что *у радиоазота — семь протонов и шесть нейтронов, а у ядра углерода 13 — шесть протонов и семь нейтронов.* У ядра радиоазота по сравнению с ядром углерода имеется один лишний протон и на один нейтрон меньше. Следовательно, чтобы из ядра

радиоазота получить ядро углерода 13, надо в ядре радиоазота заменить избыточный протон на нейтрон. Таким образом, мы приходим к заключению, что суть ядерного превращения — «радиоазот превращается в углерод» — состоит в том, что *один из семи имеющихся у азота протонов превратился в нейтрон*. Вот при таком превращении (заряд ядра при этом действительно уменьшается на единицу) за счёт образующегося избытка энергии вблизи ядра и возникает позитрон.

П р и м е р II. «Радионатрий» превращается в магний 24. Схема превращения следующая:

$$^{24}_{11}\mathrm{Na}^* \rightarrow {}^{24}_{12}\mathrm{Mg} + {}^{0}_{-1}e \text{ (электрон).}$$

Чем отличается исходное ядро радионатрия от ядра магния 24, образующегося в результате превращения? Массовое число у обоих ядер одинаковое. Следовательно, в обоих ядрах суммарное число протонов и нейтронов одинаково. Однако заряды этих ядер не одинаковы. Заряд ядра радионатрия равен одиннадцати, а заряд ядра магния 24 равен двенадцати. Это означает, что ядро радионатрия состоит из одиннадцати протонов и тринадцати нейтронов, а ядро магния состоит из двенадцати протонов и двенадцати нейтронов. У ядра радионатрия на один нейтрон больше, чем у ядра магния 24. Зато у последнего на один протон больше. Следовательно, для получения из радионатрия ядра магния 24 нужно заменить один избыточный нейтрон на протон. Таким образом, мы приходим к выводу, что превращение ядра радионатрия состоит в том, что *один из нейтронов радионатрия превратился в протон*, что и привело к образованию ядра магния 24. Это превращение сопровождается появлением в пространстве, окружающем ядро, свободного электрона.

Таким образом, появление позитронов и электронов является как бы сигналом о том, что в ядре происходит превращение одних из составляющих его частиц в другие. Появление электрона означает, что один из нейтронов, находящихся внутри ядра, превратился в протон.

Это превращение можно записать следующим образом:

$$^{1}_{0}n \rightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{0}_{-1}e.$$

Появление позитрона означает, наоборот, что протон превратился в нейтрон. Это превращение можно записать так:

$$ {}_{1}^{1}\mathrm{H} \longrightarrow {}_{0}^{1}n + {}_{+1}^{0}e. $$

Итак, протоны и нейтроны, находящиеся внутри ядра, могут превращаться друг в друга. Конечно, как в отношении протонов, так и в отношении нейтронов были попытки представлять их вечными и неизменными. Однако этот период был очень недолговременным. Физики довольно скоро поняли, что и эти элементарные частицы, так же как и сами атомные ядра, не являются неизменными. Протоны и нейтроны могут превращаться друг в друга, в этом смысле мы можем говорить об исчезновении одних частиц, например протонов, и о появлении вместо них других — нейтронов.

Можно, конечно, как это иногда и делают, считать протон и нейтрон разными состояниями одной частицы. Для такой частицы было предложено название «нуклон» (что означает ядерная частица). Если принять это предположение, то можно говорить, что протон есть одно из возможных состояний нуклона, а нейтрон есть другое возможное состояние нуклона.

О радиоактивности нейтрона

Итак, ядерная частица может находиться как в состоянии, называемом «протон», так и в состоянии, называемом «нейтрон». В *ядрах* может происходить переход частицы из одного состояния в другое. Естественно возникает вопрос: не могут ли происходить подобные превращения с частицами, находящимися *в свободном состоянии*? Возможно ли наблюдать непосредственный переход протона в нейтрон или нейтрона в протон?

Чтобы ответить на этот вопрос, сопоставим значения масс обеих частиц:

масса протона $m_p = 1{,}00758$,
масса нейтрона $m_n = 1{,}00893$.

Это сопоставление показывает, что масса нейтрона больше, чем масса протона. Добавим к этому, что масса позитрона также отлична от нуля и равна 0,00055 единицы атомной

массы. Из этого сопоставления видно, что масса (и энергия) нейтрона и позитрона больше массы (и энергии) протона

$$(m_n + m_e - m_p)\,c^2 = 1{,}8 \text{ миллиона электрон-вольт.}$$

Поэтому протон не может «сам собою» превращаться в нейтрон и позитрон. Для этого превращения протону нужно сообщить энергию 1,8 миллиона электрон-вольт.

В ядре, обладающем избытком энергии, протон может в результате взаимодействия с другими ядерными частицами приобрести энергию, необходимую для превращения в нейтрон. Однако в свободном состоянии протону негде позаимствовать эту энергию, и превращения свободных протонов в нейтроны не происходит. Протоны — ядра атома водорода — оказываются стабильными.

Совсем иное соотношение существует для нейтронов. Масса нейтрона больше массы протона; она даже превосходит массу протона и электрона, вместе взятых.

Это значит, что при превращении

$${}^{1}_{0}n \longrightarrow {}^{1}_{1}\mathrm{H} + {}^{0}_{-1}e$$

должна выделиться энергия (около 800 000 электрон-вольт). Таким образом, мы видим, что *самопроизвольное* превращение свободного нейтрона в протон оказывается возможным. Избыточную энергию, образующуюся при таком превращении, получает электрон, поэтому в ходе превращения должно наблюдаться появление электронов с энергией 800 000 электрон-вольт.

Самопроизвольный переход нейтрона в протон не только возможен, но и непременно будет происходить, ибо мы знаем, что система, обладающая избытком энергии, стремится перейти в такое состояние, при котором её энергия будет иметь наименьшее значение. В этом отношении между переходом нейтрона в протон и переходом, например, радионатрия в магний 24 имеется полная аналогия. И в том и в другом случае исчезает нейтрон, а вместо него появляются протон и электрон, обладающий большой энергией. Следовательно, можно ожидать, что эти два процесса должны протекать сходным образом. Но процесс перехода радионатрия в магний 24 носит характер радиоактивного превращения. Поэтому и превращение нейтрона в протон должно происходить по тем же законам. Итак, свободные,

не находящиеся в ядрах нейтроны должны быть радиоактивными. Однако наблюдать такую радиоактивность нелегко.

Вспомним, что нейтроны в свободном состоянии существуют очень короткий промежуток времени. «Освобождённый» из ядра нейтрон движется до тех пор, пока не встретится с каким-либо другим ядром и не поглотится последним. Вследствие этого мы можем наблюдать его в свободном состоянии только во время движения от одного ядра, из которого нейтрон был освобождён, до другого ядра, захватившего его. Даже если замедлить нейтрон до тепловой скорости ($\sim 2 \cdot 10^5$ *см/сек* при комнатной температуре), то и в этом случае время, в течение которого можно изучать поведение нейтрона, будет всего лишь около 10^{-4} сек.

За эти 10^{-4} сек., в течение которых нейтрон пройдёт путь, равный примерно 20 *см*, мы должны успеть обнаружить его радиоактивный распад. Но мы уже знаем, что радиоактивное превращение происходит не одновременно со всеми радиоактивными частицами, а постепенно. Вероятность такого превращения определяется (см. стр. 44) величиной константы распада. Из всего количества радиоактивных ядер N_0 в одну секунду распадается λN_0 ядер, где λ— константа радиоактивного распада.

Хорошо, если константа радиоактивного распада нейтронов — достаточно большая величина: тогда число нейтронов, распадающихся за время их свободного пробега, будет значительным и распад их удастся обнаружить на опыте. Если же λ у нейтронов окажется не очень большой величиной, то число нейтронов, распадающихся за 10^{-4} сек. (равное $10^{-4}\lambda N_0$), будет настолько мало, что обнаружение радиоактивного распада нейтронов окажется невозможным.

Для обнаружения радиоактивного распада нейтронов, даже при не очень малом значении λ, требуется пучок нейтронов большой интенсивности. Между тем число нейтронов, возникающих в процессе ядерных превращений, как мы уже знаем, очень невелико. Создание источника нейтронов, дающего 10^8—10^9 нейтронов в секунду, до недавнего времени было практически невозможно. Поэтому мы и не наблюдали радиоактивности нейтронов. Лишь появление ядерных реакторов — котлов (о которых мы расскажем позднее), создающих громадное количество нейтронов, превышающее

10^{12} в секунду, позволило в 1950 г. наблюдать радиоактивный распад нейтронов. Оказалось, что нейтроны распадаются с периодом полураспада равным приблизительно 13 минутам. За 13 минут половина нейтронов, находящихся в свободном состоянии, распадается, превращаясь в протоны. Электроны, образующиеся при этом распаде, обладают непрерывным спектром энергии, форма которого аналогична форме бета-спектров радиоактивных веществ.

Открытие радиоактивности нейтрона имеет большое научное значение. Радиоактивность нейтрона непосредственно подтверждает приведённую выше гипотезу о том, что радиоактивный бета-распад и распад с испусканием позитронов (а также и K-захват) являются следствием происходящих внутри ядер превращений нейтронов в протоны (бета-распад) или протонов в нейтроны (позитронный распад, K-захват).

Вместе с тем установление факта превращения нейтрона в протон наряду с другими превращениями, описанными ранее (превращение гамма-кванта в позитрон и электрон, электрона и позитрона в гамма-кванты, мезона в электрон или позитрон, превращение мезонов одной массы в мезоны другой массы), является замечательной иллюстрацией положения диалектического материализма о взаимной превращаемости одних форм материи в другие формы.

Ядерные силы

Вернёмся к вопросу о радиоактивных превращениях, совершающихся в атомных ядрах.

Почему нуклон переходит из состояния «протон» в состояние «нейтрон», и наоборот? Как и когда это происходит?

Чтобы разобраться в этом, посмотрим, какие силы действуют между ядерными частицами. Что мы можем сказать о силах, действующих между частицами, находящимися внутри ядер? Ясно, что, поскольку в ядрах имеются заряженные частицы — протоны, между ними должны действовать электрические силы. Так как знак заряда всех протонов один и тот же, а одноимённые заряды отталкиваются друг от друга, то силы, действующие между протонами, будут силами отталкивания. Если бы между частицами в ядрах не действовали никакие другие силы, то ядра не могли

бы оставаться в устойчивом состоянии, ибо протоны, входящие в них, отталкиваясь, разлетались бы во все стороны.

Но атомные ядра существуют, значит, на протоны действуют, помимо электрических, ещё какие-то силы, и эти силы должны быть обязательно силами притяжения, величина которых превосходит силы отталкивания.

Что же это за силы? До сих пор в природе мы встречались с двумя типами сил: это — силы электрические и силы гравитационные (силы тяготения). Очевидно, что силы, о которых идёт речь, не могут быть электрическими силами. Ясно также, что эти силы не являются гравитационными, ибо гравитационные силы между столь малыми массами, какими являются массы протона и нейтрона, ничтожно малы и не могут играть в ядерных явлениях какую-нибудь заметную роль.

Таким образом, мы приходим к неизбежному выводу о том, что между частицами в атомных ядрах действуют особые, специфические для ядра силы, с которыми ранее мы не встречались. Представление об особой природе этих сил было развито советскими учёными И. Е. Таммом и Д. Д. Иваненко.

Между какими частицами действуют эти специфические силы? Являются ли они только силами взаимодействия между протонами и нейтронами или действуют также и между другими частицами, например между двумя нейтронами или между двумя протонами? Как изменяются эти силы с изменением расстояния между частицами? Какова их величина?

Оказалось, что ядерные силы на малых расстояниях (порядка 10^{-13} *см*) очень велики. Они значительно больше, чем силы отталкивания, действующие между заряженными частицами (протонами), находящимися на таком же расстоянии.

С увеличением расстояния ядерные силы убывают настолько быстро, что на расстоянии $2—3 \cdot 10^{-13}$ *см* они практически равны нулю.

Это обстоятельство резко отличает ядерные силы от электрических сил, действие которых подчинено закону Кулона, известному из школьного курса физики.

Электрические силы действуют на расстояниях, значительно превосходящих размеры ядра, поэтому, сколько бы

в ядре ни было заряженных частиц, каждая из них действует на все остальные, и все остальные заряженные частицы действуют на каждую заряженную частицу. Иными словами, электрические силы действуют между всеми заряженными частицами, находящимися в ядре.

Иначе ведут себя ядерные силы. Так как они очень быстро убывают с расстоянием, то их действие распространяется не на все частицы, находящиеся в ядре, а только на соседние. Более того, особенность ядерных сил сказывается и на числе взаимодействующих соседей. В этом отношении ядерные силы напоминают силы, определяющие химические свойства вещества. Подобно химическим силам, ядерные силы обладают «валентностью», т. е. наиболее устойчивые образования получаются при определённом числе взаимодействующих частиц.

Наиболее значительные силы существуют между четвёркой частиц, две из которых являются протонами, а две — нейтронами. Эта особенность ядерных сил приводит к тому хорошо оправдываемому на опыте факту, что альфа-частицы, состоящие как раз из такого количества протонов и нейтронов, оказываются чрезвычайно устойчивыми образованиями и что наиболее устойчивыми ядрами являются те, у которых число нейтронов равно числу протонов. При равном соотношении числа протонов и нейтронов энергия ядра будет наименьшей. Если бы мы составили ядро с несколько иным соотношением частиц, например, одним нейтроном было бы в нём меньше (число нейтронов равнялось бы $n-1$) и одним протоном больше (число протонов равнялось бы $n+1$), то энергия такого ядра была бы больше, чем энергия ядра, содержащего такое же число ($2n$) частиц, но составленного поровну из протонов и нейтронов. Поскольку всякая система стремится перейти в состояние с наименьшей энергией, первое из рассматриваемых ядер, состоящее из $n+1$ протонов и $n-1$ нейтронов, будет стремиться превратиться во второе, состоящее из n протонов и n нейтронов.

Как же должно совершиться это превращение? Очевидно, что для этого необходимо, чтобы один протон превратился в нейтрон. Такое превращение, как мы уже знаем, будет сопровождаться выбрасыванием позитрона. Это будет позитронный радиоактивный распад. Таково следствие, вы-

текающее из характера действня ядерных снл. В ядрах с чнслом нейтронов, меньшим чнсла протонов, должен наблюдаться позитронный радиоактивный распад. И действительно, позитронный распад имеет место у тех ядер, у которых число нейтронов меньше числа протонов. Приведём примеры: ядро $^{10}_{6}C^*$— нзотоп углерода. Этот изотоп радиоактнвен; он распадается с излученнем позитрона. В ядре $^{10}_{6}C^*$ заключено 4 нейтрона и 6 протонов. В результате распада оно превращается в устойчнвое ядро $^{10}_{5}B$, которое содержнт 5 нейтронов н 5 протонов. Ядро нзотопа кнслорода $^{14}_{8}O$ нмеет 6 нейтронов и 8 протонов. При распаде, сопровождающемся нспусканием позитронов, оно превращается в ядро $^{14}_{7}N$ (устойчивый изотоп азота). В ядре $^{14}_{7}N$ содержится 7 протонов н 7 нейтронов. Следовательно, еслн ядро содержнт больше протонов, чем нейтронов, то оно оказывается неустойчнвым и испытывает позитронный радиоактивный распад.

С другой стороны, ядра, имеющне избыток нейтронов, также будут неустойчивы. Онн будут нспытывать радиоактивный бета-распад, сопровождающнйся нспусканием электронов. Напрнмер, ядро $^{20}_{9}F$ содержнт 11 нейтронов и 9 протонов. Распадаясь с нзлученнем электрона, оно превращается в $^{20}_{10}Ne$ (устойчивый нзотоп неона), ядра которого содержат 10 нейтронов и 10 протонов.

Произойдёт нлн не пронзойдёт превращенне одного тнпа ядра (с одним числом протонов и нейтронов) в другой тнп ядра (с другнм чнслом протонов н нейтронов),— это завнснт прежде всего от соотношення между энергиямн обонх ядер. У лёгких элементов нанменьшей энергней обладают ядра, в которых число нейтронов равно чнслу протонов.

В полном балансе энергнн ядра нмеет значенне не только энергня, обусловленная действнем специфнческих ядерных сил, но также н энергия, обусловленная действнем электрических сил отталкивания между протонами, входящнми в это ядро. По мере роста общего чнсла ядерных частиц будет расти н число протонов. Значенне отталкивательных снл между протонамн будет всё более н более возрастать. Ядра, имеющие одинаковое число протонов н нейтронов, уже не будут самымн устойчнвыми. Более устойчнвымн

оказываются те ядра, у которых число нейтронов несколько превышает число протонов. Так, в ядре единственного устойчивого изотопа родия $^{103}_{45}Rh$ находится 58 нейтронов и только 45 протонов, т. е. отношение числа нейтронов к числу протонов уже не равно единице, а составляет 1,29. В ядре единственного устойчивого изотопа висмута $^{209}_{83}Bi$ содержится 126 нейтронов и только 83 протона. Отношение числа нейтронов к числу протонов равно 1,52. Чем больше атомный номер вещества, т. е. чем больше протонов в ядре этого вещества, тем больший избыток нейтронов необходим для того, чтобы ядро было устойчивым.

Вернёмся ещё раз к вопросу о том, между какими частицами действуют ядерные силы.

Вначале предполагалось, что специфические ядерные силы действуют только между разноимёнными частицами, т. е. только между протонами и нейтронами. Однако прямыми опытами, основанными на изучении столкновений быстрых протонов с ядрами водорода, удалось установить, что специфические ядерные силы действуют также и между двумя протонами.

Изучение рассеяния быстрых нейтронов дейтронами и протонами дало возможность установить, что специфические ядерные силы действуют и между двумя нейтронами. Поэтому в настоящее время считают, что ядерные силы действуют между всеми частицами, входящими в состав ядра.

Модель ядра

Как же расположены в ядре составляющие его частицы?

На этот вопрос дали ответ, независимо друг от друга, советский физик Я. И. Френкель и датский физик Нильс Бор. По их теории строение ядер принципиально отличается от строения атомов. В атоме мы имеем ядро с большим зарядом и массой, являющееся центром системы, и электроны, окружающие это ядро. В атомном ядре такого центра нет. Населяющие его частицы — протоны и нейтроны — хотя и не тождественны друг другу, но всё же в известной мере эквивалентны, ибо между всеми ядерными частицами действуют приблизительно равные силы. Более того, силы, действующие между ядерными частицами, весьма велики. По-

этому все частицы, находящиеся в ядре, будут стремиться расположиться возможно ближе друг к другу.

Совершенно аналогичная картина имеет место в капле жидкости. Все молекулы, составляющие каплю, идентичны; силы, действующие между ними, одинаковы. Под действием этих сил капля жидкости стремится принять форму, которая соответствует минимуму энергии. Такой формой является сфера. Аналогия между каплей жидкости и ядром оказалась весьма глубокой, ибо во многом поведение атомных ядер напоминает поведение заряженной капли жидкости. Так же как в капле жидкости, частицы, составляющие ядро, взаимодействуют друг с другом и обмениваются энергией. Если бы силы взаимодействия между ядерными частицами не были столь велики, мы могли бы наблюдать явление, аналогичное испарению жидкости. Хорошо известно, что испарение жидкости происходит вследствие того, что какая-то из молекул случайно приобретает большую энергию, достаточную, чтобы преодолеть притяжение других молекул. Испарения ядерных частиц обычно не происходит, ибо частицам надо преодолеть слишком большое притяжение. Однако если мы «подогреем» ядро, т. е. сообщим ему добавочную энергию, то может произойти нечто аналогичное испарению — из ядра вылетает одна из частиц. Чтобы такое явление произошло, нужно подогреть ядро на миллиарды градусов.

Как же можно осуществить такой нагрев ядра?

Давайте обстреляем ядро какой-нибудь быстрой частицей — протоном, нейтроном или альфа-частицей. Что произойдёт, когда такая частица проникнет в ядро? Войдя в ядро, она тотчас же начнёт взаимодействовать с остальными частицами ядра, обмениваясь с ними своей энергией. В результате попавшая в ядро частица растеряет свою энергию и не сможет выйти из ядра. Это обстоятельство очень хорошо иллюстрируется механической моделью, изображённой на рис. 48. В маленькой лунке находится много шариков. Что произойдёт, если мы втолкнём туда ещё один шарик? Конечно, если бы лунка была пустая и не было бы трения между шариком и стенками лунки, то наш шарик, попав в лунку, быстро бы из неё выскочил. Однако если лунка заполнена шариками, то наш шарик не сможет так легко проскочить. Он будет сталкиваться с другими шариками, передаст им часть своей энергии и в конце концов у него

самого останется так мало энергии, что он будет не в состоянии выскочить из лунки. После его появления в лунке находившиеся в ней шарики начнут хаотически двигаться. Если бы не было трения между шариками и стенками лунки, то в конце концов у какого-нибудь шарика собралась бы значительная энергия и он выскочил бы из лунки. Но это мог быть совсем не тот шарик, который мы втолкнули в лунку, а какой-то иной.

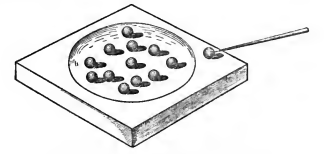


Рис. 48. Модель ядерных превращений.

То же самое происходит и в ядре, с той лишь разницей, что частицы, его составляющие, находились в хаотическом движении и обменивались энергиями и до появления в нём новой частицы. Влетающая частица передаёт свою энергию всем частицам, находящимся в ядре. Эта энергия распределяется между всеми частицами более или менее равномерно. Движение частиц попрежнему будет хаотичным, но кинетическая энергия их будет больше. В этом смысле можно применять термин «нагревание» ядра.

Проникновение частицы внутрь ядра будет иметь два следствия:

1) образуется новое ядро, содержащее на одну частицу больше прежнего;

2) в новом ядре имеется избыток энергии, который принесла с собой попавшая в ядро частица. Ядро будет возбуждено, «нагрето» на миллиарды градусов (средняя энергия теплового движения частиц ядра при температуре в один миллиард градусов равна приблизительно 0,1 миллиона электрон-вольт).

У такого «нагретого» ядра может произойти явление «испарения». Избыток энергии или значительная доля его могут со временем сосредоточиться у одной какой-нибудь частицы, и эта частица «испарится», покинет ядро. Про-

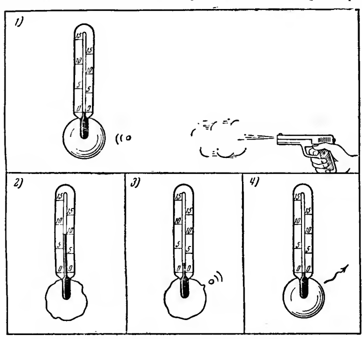


Рис. 49. Возбуждение ядра по Бору — Френкелю.

1 — «ядро», в котором помещён термометр с двойной шкалой. Левая шкала градуирована на десятки миллиардов градусов, правая — на миллионы электрон-вольт. В ядро «выстрелили» нейтроном; 2 — нейтрон попал в ядро. «Ядро-капля» нагрелось. Температура достигла 80 миллиардов градусов (10 миллионов электрон-вольт). Все частицы в ядре возбуждены. Капля находятся в состоянии колебательного движения; 3 — «испарилась» одна частица. Температура ядра понизилась; 4 — «ядро» испустило квант гамма-лучей и перешло в нормальное состояние.

изойдёт то, что мы назвали превращением ядра. Происходящее событие хорошо иллюстрируется рис. 49.

Какая же частица может испариться? Для определённости предположим, что в ядро попал нейтрон большой энергии. В образовавшемся новом ядре избыток энергии

может сосредоточиться, например, у одного из протонов — из ядра вылетит протон. Произойдёт превращение типа

$$^{27}_{13}Al+^{1}_{0}n \rightarrow ^{27}_{12}Mg+^{1}_{1}H.$$

С точки зрения рассматриваемой модели это превращение совершается двумя этапами. В первом этапе происходит образование составного ядра, захватившего частицу:

$$^{27}_{13}Al+^{1}_{0}n \rightarrow ^{28}_{13}Al^{*}.$$

Это составное ядро «перегретое» — в нём имеется избыток энергии, который получает один из протонов. Наступает второй этап превращения. Получивший избыток энергии протон испаряется из ядра:

$$^{28}_{13}Al^{*} \rightarrow ^{1}_{1}H+^{27}_{12}Mg.$$

Избыток энергии может оказаться у группы частиц, состоящей из двух протонов и двух электронов. Произойдёт «испарение» всей этой группы в целом. В этом случае мы будем говорить, что вылетела альфа-частица:

$$^{27}_{13}Al+^{1}_{0}n \rightarrow ^{28}_{13}Al^{*} \rightarrow ^{24}_{11}Na+^{4}_{2}He.$$

Может быть и такой случай, что значительная часть энергии сосредоточится у какого-нибудь одного нейтрона. Тогда из ядра вылетит нейтрон. Мы получим снова первоначальное ядро, но всё-таки в возбуждённом состоянии. Если энергия возбуждения велика, то сможет «испариться» ещё одна частица, например, ещё один нейтрон, и произойдёт превращение типа

$$^{79}_{35}Br+^{1}_{0}n \rightarrow ^{80}_{35}Br^{*} \rightarrow ^{78}_{35}Br+2\,^{1}_{0}n.$$

Такие превращения действительно обнаружены на опыте при бомбардировке ядер нейтронами с энергией, большей 10 миллионов вольт. Если, однако, после вылета одной из частиц в ядре остаётся небольшой избыток энергии, то обычно она выделяется в виде кванта гамма-лучей.

Наконец, может случиться и так, что гамма-квант излучится раньше, чем избыток энергии сосредоточится у одной из частиц: после излучения гамма-кванта оставшейся у ядра энергии возбуждения будет недостаточно для выбрасывания какой-либо частицы, и нейтрон, попавший в

ядро, в нём и останется. Произойдёт захват частицы

$$^{27}_{13}Al + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{28}_{13}Al + \text{гамма-квант.}$$

Какой из этих конкурирующих процессов — вылет частицы или вылет гамма-кванта — будет происходить? Если нейтрон, попавший в ядро, принёс с собой мало энергии (медленный нейтрон), то вероятность того, что у одной ядерной частицы соберётся избыток энергии, достаточный для её вылета, будет мала. Такого события придётся ждать слишком долго. Гамма-квант вылетит раньше. Поэтому обстрел ядра медленными нейтронами приводит обычно к захвату нейтронов.

Если же обстрел ведётся нейтронами, обладающими большой кинетической энергией, то в ядро приносится большая избыточная энергия. Вероятность того, что у какой-нибудь из ядерных частиц окажется энергия, достаточная для вылета из ядра, будет значительна. В таком случае из ядра будут преимущественно вылетать частицы. У одних ядер этими частицами будут протоны, у других — нейтроны, у третьих — альфа-частицы. Мы окажемся свидетелями различных ядерных превращений.

Конечно, аналогия между ядром и каплей, хотя и глубокая, имеет свои границы. Чрезвычайно малый размер ядер (радиус 10^{-13}—10^{-12} *см*), громадная плотность электричества и массы в ядрах, громадные силы взаимодействия между частицами приводят к некоторым специфическим особенностям, которые не могут быть учтены этой моделью, но всё же она поясняет много сторон различных явлений, происходящих с атомными ядрами.

О ядерных превращениях, сопровождающихся вылетом нескольких частиц

Если энергия частицы, попавшей в ядро, будет велика — порядка 100 миллионов электрон-вольт, то ядро получит столь большую энергию — нагреется до столь высокой температуры, что сможет произойти «испарение» не одной частицы, а нескольких. При сообщении ядру энергии порядка одного миллиарда электрон-вольт ядро могло бы «испариться» полностью, т. е. все частицы, составляющие ядро, разлетелись бы во все стороны. О возможности подобных процессов свидетельствуют опыты, проведённые с дейтронами

и альфа-частицами с энергией до 200 и 400 миллионов электрон-вольт соответственно. В этих опытах обнаружен вылет из ядра большого числа частиц. Количество вылетающих из ядра частиц зависит от энергии бомбардирующей частицы. Так, при бомбардировке серебра альфа-частицами установлено, что вылет нейтрона происходит только тогда, когда энергия альфа-частицы превосходит 11 миллионов электрон-вольт. Очевидно, что столь большая энергия требуется альфа-частицам для того, чтобы преодолеть силы отталкивания, действующие между альфа-частицами и ядром серебра, и проникнуть в ядро. Однако если энергия альфа-частицы превосходит 15 миллионов электрон-вольт, то наблюдаются случаи, когда из ядра вылетают два нейтрона. Когда же энергия альфа-частицы достигает 23 миллионов электрон-вольт, то наблюдается вылет трёх нейтронов.

Аналогичные явления наблюдаются и в том случае, когда бомбардирующей частицей является дейтрон. Приведём в качестве примера превращения, наблюдавшиеся при бомбардировке ядер дейтронами с энергией 20—40 миллионов электрон-вольт:

$$^{139}_{57}La + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{141}_{58}Ce^* \longrightarrow ^{137}_{58}Ce + 4\,^{1}_{0}n,$$
$$^{121}_{51}Sb + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{123}_{52}Te^* \longrightarrow ^{119}_{52}Te + 4\,^{1}_{0}n.$$

При бомбардировке дейтронами с энергией 50 миллионов электрон-вольт обнаружены превращения, являющиеся результатом испарений, из составного ядра пяти нейтронов, например:

$$^{121}_{51}Sb + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{123}_{52}Te^* \longrightarrow ^{118}_{52}Te + 5\,^{1}_{0}n,$$
$$^{103}_{45}Rh + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{105}_{48}Pd^* \longrightarrow ^{100}_{46}Pd + 5\,^{1}_{0}n.$$

Дейтроны с энергией 60 миллионов электрон-вольт столь сильно нагревают составное ядро, что из него могут испариться шесть нейтронов. Примером этого является превращение:

$$^{139}_{57}La + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{141}_{58}Ce^* \longrightarrow ^{135}_{58}Ce + 6\,^{1}_{0}n.$$

Зарегистрированы превращения, являющиеся результатом испарения из составного ядра ещё большего числа частиц. Так, при бомбардировке урана дейтронами большой энергии, обнаружено превращение

$$^{238}_{92}U + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{240}_{93}Np^* \longrightarrow ^{231}_{93}Np + 9\,^{1}_{0}n.$$

В результате этого превращения образуется новый элемент нептуний, о котором мы подробно расскажем дальше.

При бомбардировке ядер частицами ещё бо́льших энергий происходит вылет из ядра (испарение) такого большого числа частиц, что уже трудно установить точный характер вылетевших частиц. Так, например, при бомбардировке сурьмы, состоящей из двух изотопов с массовыми числами 121 и 123, дейтронами с энергией 180 миллионов электронвольт было обнаружено появление изотопов палладия 100 и 101, серебра 102, 103 и 104, кадмия 105, 107 и 115.

Каким же образом из сурьмы, обладающей массой 123 (или 121), может появиться изотоп палладия 101?

Это возможно только в том случае, если из ядра вылетят («испарятся») не только нейтроны, но и заряженные частицы, общая масса которых равна 22 единицам (если считать, что превращение происходит с изотопом сурьмы 123), а заряд равен 15 единицам (атомный номер палладия равен 46). Мы не знаем ещё точно, сколько частиц вылетает при таком превращении, и не можем точно указать, какие именно частицы вылетели, но ясно, что их очень много и что бо́льшая часть их — нейтроны. Это заключение можно сделать на основании двух соображений:

1. При бомбардировке ядер быстрыми частицами обычно наблюдается вылет многих нейтронов и небольшого числа (1—2) заряженных частиц (протонов или альфа-частиц). Так происходит потому, что заряженные частицы могут вылетать из ядра только в случае, если они обладают значительной энергией, а нейтроны могут вылетать из ядра и с малой энергией.

2. Рассматриваемое ядро сурьмы потеряло большую массу — 22 единицы — и сравнительно (с этой массой) небольшой заряд.

Образование другого изотопа палладия с массовым числом 100 соответствует вылету из сурьмы частиц, общая масса которых 23, а заряд 5. Образование же изотопов серебра 102, 103 и 104, очевидно, произошло в результате того, что из ядра сурьмы 121 вылетели частицы с общей массой 21, 20 и 19 и зарядом 4. Образование кадмия 105 связано с вылетом частиц, общая масса которых 18, а заряд 3. Кадмий 107, очевидно, образуется с вылетом частиц с общей массой 16 и зарядом 3. Более определённое заключение о ча-

стицах, образующихся в результате такого превращения, может быть сделано для изотопа кадмия 115. Превращение, соответствующее образованию этого изотопа, таково:

$$^{123}_{51}\mathrm{Sb} + {}^{2}_{1}\mathrm{D} \rightarrow {}^{125}_{52}\mathrm{Te}^{*} \rightarrow {}^{115}_{48}\mathrm{Cd} + 2\,{}^{4}_{2}\mathrm{He} + 2\,{}^{1}_{0}n.$$

Итак, дейтрон (а также и альфа-частица) с энергией порядка 200 миллионов электрон-вольт, попадая в ядро, вызывает испарение большого числа частиц (большей частью нейтронов), среди которых имеется и несколько заряженных.

Появление при таких превращениях нескольких заряженных частиц подтверждается прямыми наблюдениями. При изучении следов дейтронов и альфа-частиц столь больших энергий в эмульсии фотопластинок обнаружено, что они образуют звёзды, подобные звёздам, создаваемым космическими лучами. Эти звёзды состоят из нескольких следов заряженных частиц. Например, некоторые из них имеют четыре-пять следов. Весьма вероятно, что дейтроны и альфа-частицы с энергией в миллиард электрон-вольт могут вызвать полное расщепление (испарение) ядра.

ГЛАВА XI

ДЕЛЕНИЕ ЯДЕР

Захват нейтронов ураном

В этой главе мы расскажем читателю о недавнем открытии, являющемся, без сомнения, одним из выдающихся достижений человечества. И здесь, как это иногда бывает, искали одно, а нашли совсем другое. Дело началось с истории о природе так называемых «трансуранов». Суть её заключается в следующем. Как вытекает из данных, приведённых в главе VII, можно путём облучения нейтронами сделать радиоактивными большинство химических элементов. Если радиоактивное превращение будет сопровождаться излучением электрона (бета-распад), то в результате образуется элемент, стоящий в таблице Менделеева на единицу дальше облучаемого.

Периодическая система Менделеева состоит из 92 элементов. Последнее место занимает в ней уран. Ферми и решил попробовать облучить уран нейтронами. Ему хотелось посмотреть, не образуется ли при этом элемент, который должен был бы стоять в таблице Менделеева дальше урана — элемент № 93, которого до сих пор в природе мы не встречали. Такой элемент, вероятно, был бы сам радиоактивен, ибо в противном случае мы нашли бы его среди устойчивых элементов. Распад его ядер, вероятно, давал бы столь же богатую и интересную картину ядерных превращений, как и радиоактивный распад ядер урана. Возможно также, что в результате нескольких превращений образовался бы элемент с ещё бóльшим атомным номером, например, 94.

Может быть, эти превращения познакомили бы нас со свойствами неизвестных до тех пор на земле элементов и приоткрыли бы завесу над тайной ограниченности числа

химических элементов; может быть, стало бы понятным, почему именно уран является последним элементом периодической системы. Вот эти интересные мысли и побудили Ферми подвергнуть уран облучению нейтронами.

Опыт оказался успешным. После облучения урана нейтронами Ферми нашёл, что у урана появилось новое радиоактивное излучение, до тех пор не наблюдавшееся. Это излучение состояло из бета-лучей довольно сложного состава.

Из анализа кривой спадания интенсивности нового излучения удалось установить наличие четырёх периодов полураспада, именно: 10 секунд, 40 секунд, 13 минут и, наконец, 90 минут. Наряду с этими четырьмя периодами полураспада можно было предполагать наличие ещё по крайней мере одного более длинного периода.

Мы хорошо знаем, что наличие в составе излучения каждого отдельного периода полураспада соответствует наличию в составе излучающего вещества определённого радиоактивного изотопа. Изотопов у урана, как известно, всего лишь три:

$$^{238}_{92}U^*,\ ^{235}_{92}U^*,\ ^{234}_{92}U^*.$$

Относительная распространённость последних двух изотопов весьма мала. $^{235}_{92}U^*$ составляет $\frac{1}{140}$, а $^{234}_{92}U^*$ $\frac{1}{17\,000}$ долю $^{238}_{92}U^*$. Поэтому наличие в составе бета-излучения урана, подвергнувшегося бомбардировке нейтронами, пяти, а возможно, и более периодов полураспада сразу же показало, что мы имеем здесь дело со сложным явлением. И действительно, разобраться в этом явлении оказалось нелегко. Понадобилась пятилетняя работа многих крупнейших знатоков радиоактивности, пока стало ясно, в чём здесь дело.

Предполагая, что по крайней мере один из наблюдаемых им периодов полураспада принадлежит элементу № 93, Ферми попытался его идентифицировать, исходя из предположения, что в силу основных закономерностей периодической системы элемент № 93 является химическим аналогом элементов марганца и рения, с которыми он должен находиться в одном вертикальном столбце таблицы Менделеева.

Мы не будем останавливаться на деталях всей сложной химической процедуры, заметим только, что из полученных данных следовало, что ни один из элементов от 86 до 92 включительно не мог быть носителем радиоактивного излучения с периодом от 13 до 90 минут. Оставалось предположить, что и сделал Ферми, что открытое им бета-излучение исходит от элемента с № 93 или с ещё более высоким атомным номером, образовавшегося вследствие бета-распада урана, захватившего нейтрон.

Это открытие вызвало огромный интерес среди учёных. Многие из них подвергли сомнению однозначность заключений Ферми. По их мнению, химические манипуляции, проведённые им, допускали и другое толкование. Вскоре было экспериментально доказано, что протактиний обладает химическими свойствами, аналогичными обнаруженным Ферми для 13-минутной активности. Выводы Ферми стали казаться сомнительными. Так возникла проблема существования «трансуранов» (т. е. элементов, стоящих за ураном в периодической системе), привлекшая внимание многих исследователей.

Исследование природы трансуранов

Занявшись детальным изучением трансуранов, Ган, Мейтнер и Штрассман скоро убедились, что дело обстоит гораздо сложнее, чем первоначально предполагал Ферми. Кривая ослабления интенсивности радиоактивного излучения выглядела различно в разные времена наблюдения. Создавалось впечатление, что некоторые радиоактивные вещества возникают не во время облучения, а спустя некоторое время. Если бы оно оказалось правильным, то это означало бы, что новые вещества образуются не во время облучения урана нейтронами, а возникают впоследствии, в результате происшедших радиоактивных превращений, и что, следовательно, имеет место цепь радиоактивных превращений.

Произведённый Ганом, Мейтнер и Штрассманом тщательный анализ кривой ослабления интенсивности радиоактивного излучения подтвердил это предположение, и в результате длительных исследований они составили следующие схемы превращений, происходящих с ураном после его об-

лучения нейтронами:

1. $_{92}U + {}^1_0n \rightarrow {}_{92}U^*$ (10 сек.) $\rightarrow {}_{93}$Eka Re* (2,2 мин) $\rightarrow$
$\rightarrow {}_{94}$Eka Os* (59 мин.) $\rightarrow {}_{95}$Eka Ir* (66 час.) $\rightarrow$
$\rightarrow {}_{96}$Eka Pt* (45 час.) $\rightarrow {}_{97}$Eka Au (не радиоактивен),
2. $_{92}U + {}^1_0n \rightarrow {}_{92}U^*$ (40 сек.) $\rightarrow {}_{93}$Eka Re* (16 мин.) $\rightarrow$
$\rightarrow {}_{94}$Eka Os* (5,7 час.) $\rightarrow {}_{95}$Eka Ir (не радиоактивен),
3. $_{92}U + {}^1_0n \rightarrow {}_{92}U^*$ (23 мин.) $\rightarrow {}_{93}$Eka Re (не радиоактивен).

В схемах, описывающих превращения урана, Ган и Штрассман предложили обозначать символы неизвестных тогда элементов, которые должны были бы располагаться в таблице Менделеева за ураном, через приставку Eka (означающую — «стоящий за»). Так элемент № 93 они предложили называть экарением — Eka Re (что значит стоящий в вертикальном столбце таблицы Менделеева за рением), элемент № 94 экаосмием — Eka Os, элемент № 95 — экаиридием Eka Ir и т. д. Справа от символа элемента в скобках указаны величины периода полураспада данного радиоактивного изотопа.

Как видно из приведённых схем с ураном, облучённым нейтронами, происходит удивительная цепь последовательных радиоактивных превращений. Начальные члены это цепи, имеющие периоды полураспада в 10 сек. и 40 сек., были надёжно установлены в результате длительной и кропотливой работы, непосредственным химическим путём. Период 2,2 минуты оказался дочерним от 10-секундной активности. Период 16 минут оказался дочерним от 40-секундной активности. Варьируя время облучения урана нейтронами, можно было с несомненностью подтвердить связь между названными периодами. Аналогичная связь установлена и для следующих звеньев этих радиоактивных ветвей.

Последующее изучение химических свойств радиоактивных веществ, обладающих периодами, указанными в этих схемах, казалось, подтвердило найденную взаимную связь периодов. Следует отметить лишь, что периоды 13 и 90 минут, найденные Ферми, заменены более точными значениями, которые по измерениям Мейтнер оказались равными 16 и 59 минутам соответственно. Кроме того, было обнаружено большое число периодов, не замеченных ранее Ферми, в осо-

бенности более продолжительных. Общее число их достигло девяти, а наибольшее значение атомного номера обнаруженных трансуранов возросло до 97.

В схеме превращений трансуранов, предложенной Ганом, Мейтнер и Штрассманом, имеются три параллельно идущих ряда радиоактивных превращений. Но почему именно три ряда? Может быть, это соответствует трём различным изотопам у исходного продукта урана? Может быть, один ряд образуется ураном 238, другой — ураном 235, третий — ураном 234? Однако измерения интенсивности возникающих излучений не позволили приписать мало распространённому изотопу $^{235}_{92}U$, а тем более изотопу $^{234}_{92}U$ ответственность за обнаруженные периоды полураспада, поэтому пришлось считать, что все указанные ряды превращений происходят с одним изотопом урана — $^{238}_{92}U$. Это обстоятельство, естественно, не могло не вызвать недоумения. Хотя связь между различными радиоактивными продуктами, возникающими и распадающимися после облучения урана нейтронами, была установлена надёжно и хотя казалось, что объяснение, данное Ганом и Мейтнер, является единственно возможным, тем не менее возникали многие недоуменные вопросы, к числу которых относились, например, следующие:

1. Если все установленные дочерние продукты действительно произошли от изотопа $^{238}_{92}U$, тогда трансураны должны обладать изомерными состояниями. Казалось странным, что образуется сразу три изомерных состояния.

2. Не ясно, какова может быть природа такой изомерии.

3. Почему у урана захват одного нейтрона создаёт столь сильную неустойчивость, что необходимо целых пять бета-распадов, чтобы получился устойчивый продукт? Да и действительно ли он устойчив? Очень странным казалось, чтобы элементы с атомным номером 95 или 97 могли быть стабильными.

Обнаружение редкоземельных элементов среди продуктов превращения урана

К этим вопросам скоро прибавились новые.

Жолио-Кюри и Савич, исследуя методом фильтрации периоды радиоактивных распадов урана, облучённого нейтронами, нашли, кроме периодов в 40 секунд, 2,2 минуты и

16 минут, отмеченных уже в работе Гана, Мейтнер и Штрассмана, ещё и период, равный 3,5 часа. Исследуя его химическую природу, они обнаружили, что носитель этой активности является аналогом редкоземельного элемента лантана. Поэтому они предположили, что радиоактивный изотоп актиния, являющийся аналогом лантана, и есть искомый радиоактивный излучатель с периодом 3,5 часа. Однако вскоре они заметили чрезвычайно странную вещь. Радиоактивный изотоп с периодом в 3,5 часа удалось химически отделить от актиния, но совершенно невозможно было отделить от лантана. Из этих данных следовало, что радиоактивный продукт с периодом полураспада 3,5 часа не есть изотоп актиния, как первоначально предположили Жолио-Кюри и Савич, а скорее является изотопом лантана. Жолио-Кюри и Савич по существу открыли деление урана, но не поняли подлинного смысла своего открытия.

Ган и Штрассман повторили работу Жолио-Кюри и Савича, несколько расширив программу исследования. Они искали среди продуктов превращения урана не только аналоги лантана, но также и радиоактивные вещества, являющиеся аналогами бария. Им удалось установить, что подобно барию ведут себя три радиоактивных вещества, периоды полураспада которых равны соответственно 25 минутам и 110 минутам (третий период полураспада измерен был неточно и был равен нескольким дням). Из этих исходных веществ образовывались дочерние вещества, также радиоактивные. Эти дочерние продукты распада в химическом отношении вели себя аналогично лантану (который в таблице Менделеева идёт вслед за барием). Так же как Жолио-Кюри и Савич, Ган и Штрассман решили вначале, что они наблюдают только аналоги бария и лантана, но что в действительности радиоактивными излучателями являются радиоактивные изотопы радия $_{88}Ra$ и актиния $_{89}Ac$ (радий в таблице Менделеева расположен в одном вертикальном столбце с барием, а актиний с лантаном, поэтому химические свойства радия и бария, а также лантана и актиния сходны между собой). Однако вскоре и они принуждены были убедиться в том, что радиоактивные излучатели, образующиеся в результате превращения урана, ведут себя отлично от радия и актиния. С другой стороны, их было

невозможно химически отличить от элементов бария и лантана.

Ган и Штрассман писали в своей работе следующее:

«Как химики мы принуждены определённо заявить, что новые вещества [подразумеваются продукты захвата нейтрона ураном] ведут себя не как радий, а как барий». Вот к какому неожиданному результату привела «охота»за трансуранами.

К поставленным ранее неразрешённым вопросам теперь можно присоединить новый.

4. Каким образом в результате бета-превращений урана могли образоваться радиоактивные изотопы стабильных элементов бария и лантана, находящихся, как известно, не в конце таблицы Менделеева, а в её середине?

Деление урана

Первой нашла разгадку Лиза Мейтнер. Она предположила, что превращение урана, захватившего нейтрон, происходит не так, как это происходило у обычных радиоактивных веществ. Это превращение не связано с выбрасыванием из возбуждённого ядра ни бета-частиц, ни альфа-частиц. Отсутствие последних в превращении урана было доказано контрольными опытами. По мнению Мейтнер, возбуждённое ядро урана, образовавшееся в результате проникновения в него нейтрона, распадается на два более лёгких ядра; *при этом заряд и масса ядра делятся между этими осколками приблизительно пополам.* Обнаруженные Ганом и Штрассманом барий и лантан и являются одними из таких осколков урана.

Гипотеза о делении ядра урана на два осколка своеобразно разрешила проблему трансуранов. Аналоги рения, осмия, иридия и других элементов вовсе не являются более тяжёлыми, чем уран, элементами (экарением, экаосмием, экаиридием). На самом деле эти элементы оказались технецием (элемент № 43 — аналог рения, но стоящий в таблице Менделеева не за рением, а впереди рения), рутением (элемент № 44 — аналог осмия, стоящий в таблице Менделеева впереди осмия), родием (элемент № 45 — аналог иридия) — элементами, примерно вдвое более лёгкими, чем

уран. Радиоактивные изотопы этих элементов и составляют, повидимому, группу осколков урана.

Немного позже мы более подробно рассмотрим, что же образуется в результате деления урана. Сейчас мы остановим внимание читателя на причинах, приводящих к делению ядер урана.

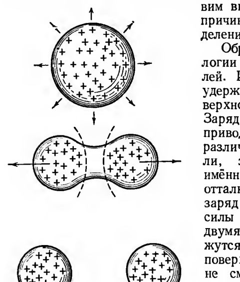


Рис. 50. Схема деления ядра-капли.

Обратимся к нашей аналогии с заряженной каплей. Известно, что капля удерживается силами поверхностного натяжения. Заряд, сообщённый капле, приводит к тому, что между различными частями капли, заряженными одноимённо, возникают силы отталкивания. Если этот заряд будет значителен, то силы отталкивания между двумя частями капли окажутся столь большими, что поверхностное натяжение не сможет им противостоять и капля разорвётся на две части. На рис. 50 изображена схема деления капли. Сначала у неё образуется перетяжка, а затем капля разрывается на две части.

Нечто похожее происходит и с тяжёлым ядром. При возрастании заряда ядра действие электрических сил отталкивания начинает преобладать над действием сил притяжения. Ядро становится неустойчивым и разваливается на две части. По расчёту у ядер с атомным номером Z, большим 100, силы отталкивания будут уже преобладать над силами притяжения.

Деление ядер может произойти даже и при меньшем значении Z, если ядро возбудить — сообщить ему дополнительную энергию. В каждом из осколков, образующихся при делении неустойчивого ядра, силы притяжения уже будут превосходить силы отталкивания, и энергия системы будет зна-

чительно меньше первоначальной. Поэтому следует ожидать, что при образовании двух осколков должно освободиться громадное количество энергии.

Теория деления ядер была развита Я. И. Френкелем и Бором и Уилером.

Химические элементы с атомным номером, бóльшим 92

Как только была выдвинута гипотеза о делении ядер, во всех физических лабораториях закипела работа. Интенсивность этой работы можно иллюстрировать следующей цифрой. Более ста научных работ, посвящённых делению ядер, было опубликовано за срок, несколько меньший года. Столь интенсивной исследовательской работы в одном каком-нибудь направлении физики ещё не знали. За короткий срок были изучены основные черты, характеризующие деление ядер, и совершенно ясно обрисовано выдающееся значение этого открытия. Однако закончим сначала вопрос о том, что же образуется в результате захвата нейтрона ураном.

О том, что среди элементов, образующихся при делении урана, найдены барий и лантан, мы уже упоминали. Вскоре среди осколков были найдены радиоактивный иттрий и стронций. В воздухе, находящемся вблизи урана, обнаружили радиоактивные изотопы криптона и ксенона. Впоследствии были найдены изотопы брома, рубидия, молибдена, сурьмы, теллура, иода, цезия и других элементов.

Большая работа по установлению природы осколков была проделана В. Г. Хлопиным и его учениками. Все эти осколки оказались изотопами элементов, находящихся в середине таблицы Менделеева. Интерес к этим элементам в связи с гипотезой о делении ядер был понятен. Однако нам хотелось бы дать ответ и на тот вопрос, который мы поставили в самом начале и который, естественно, возникает у читателя: существуют ли всё же трансурановые элементы?

Обнаружение факта деления указало на неправильность первоначального объяснения результатов облучения урана нейтронами. Элементы, принятые вначале за трансурановые, таковыми в действительности не оказались, но это всё же не отвергало возможности существования трансурановых элементов. Последующие работы показали, что та-

кие элементы есть. Элемент № 93 действительно возникает при бомбардировке урана нейтронами. Он образуется при бета-распаде урана 239 с периодом 2,3 дня. Следовательно, массовое число этого изотопа элемента № 93 будет 239.

Интересный опыт, подтверждающий образование элемента № 93, описан на стр. 327. Элемент № 93 был назван нептунием по имени планеты Нептун, находящейся в солнечной системе непосредственно за планетой Уран.

Другой изотоп нептуния $^{237}_{93}Np$ (Np — химический символ нептуния) был открыт в 1942 г. Нептуний 237 распадается, излучая альфа-частицы. Период полураспада $^{237}_{93}Np$ $2{,}2 \cdot 10^6$ лет. В настоящее время известны изотопы нептуния с массовыми числами 231, 233—239. Все они радиоактивны. Представителем элемента № 93 в периодической системе Менделеева является наиболее долгоживущий изотоп нептуния с массовым числом 237.

Следующий за нептунием элемент № 94 был открыт в конце 1940 г. Изотоп этого элемента с массовым числом 238 возникал при радиоактивном распаде нептуния 238, испускающего бета-лучи и имеющего период полураспада 2,0 дня. Элемент № 94 был назван плутонием по имени планеты Плутон, расположенной за Нептуном.

Наиболее важным изотопом плутония (химический символ Pu) является $^{239}_{94}Pu$, образующийся из $^{239}_{92}U$ путём бета-распада. $^{239}_{94}Pu$ имеет период полураспада 23 600 лет и при распаде испускает альфа-частицы.

Кроме указанных изотопов, известны ещё другие изотопы плутония с массовыми числами 232, 234—237, 241, 242. Многие из этих изотопов обладают значительным периодом полураспада. Так период полураспада плутония 240 равен 6580 годам. Плутоний 238 распадается с периодом полураспада 89 лет. Период полураспада плутония 241 равен 10 годам, а период полураспада плутония 236 равен 2,7 года. Наибольшим периодом полураспада обладает плутоний 242. Его период полураспада равен приблизительно одному миллиону лет. Плутоний 242, как наиболее долгоживущий, считается представителем элемента № 94. Распадаясь, плутоний 242 излучает альфа-частицу и превращается в уран 238.

Нептунием и плутонием не исчерпывается список элементов с атомным номером бóльшим, чем у урана. При бом-

бардировке урана и плутония альфа-частицами большой энергии (до 40 миллионов электрон-вольт), ускоренными в циклотроне, было обнаружено возникновение элементов с атомным номером 95 и 96, названных соответственно америцием (химический символ Am) и кюрием (химический символ Cm). Уже обнаружены многие изотопы и у этих элементов. У америция, например, их найдено восемь ($^{237}_{95}Am$, $^{238}_{95}Am$, $^{239}_{95}Am$, $^{240}_{95}Am$, $^{241}_{95}Am$, $^{242}_{95}Am$, $^{243}_{95}Am$, $^{244}_{95}Am$), у кюрия — семь ($^{238}_{96}Cm$, $^{240}_{96}Cm$, $^{241}_{96}Cm$, $^{242}_{96}Cm$, $^{243}_{96}Cm$, $^{244}_{96}Cm$, $^{245}_{96}Cm$). Среди этих изотопов имеются и сравнительно долгоживущие.

Так, изотоп америций 241 имеет период полураспада 490 лет, а америций 243 около 7600 лет. Это наиболее долгоживущий изотоп америция.

Изотоп кюрий 243 имеет период полураспада 35 лет, период полураспада кюрия 244 равен 19 годам, а период полураспада кюрия 245 равен 20 000 лет.

В 1950 г. были получены радиоактивные изотопы элементов с атомным номером 97 и 98. Эти элементы были названы берклием (химический символ Bk) и калифорнием (химический символ Cf). В настоящее время известны три изотопа берклия: $^{243}_{97}Bk$, $^{245}_{97}Bk$, $^{247}_{97}Bk$. Период полураспада $^{249}_{97}Bk$ равен приблизительно одному году. У калифорния найдено больше изотопов — $^{244}_{98}Cf$, $^{246}_{98}Cf$, $^{248}_{98}Cf$, $^{249}_{98}Cf$, $^{250}_{98}Cf$, $^{251}_{98}Cf$, $^{252}_{98}Cf$, $^{253}_{98}Cf$. Калифорний 249 имеет период полураспада, равный приблизительно 500 годам.

Все трансурановые элементы образуются при бомбардировке нейтронами или альфа-частицами сначала урана, затем плутония, америция, кюрия, берклия и калифорния. В результате таких бомбардировок уже получены изотопы элемента № 99 [его назвали эйнштейнием (E) в честь А. Эйнштейна] с массовыми числами 252, 253, 254 и 255. Установлено существование изотопов элемента с атомным номером 100 [фермий (Fm) в честь Э. Ферми], имеющих массовые числа 254, 255 и 256. В 1955 г. Сиборг с сотрудниками сообщили о получении ими радиоактивного изотопа элемента № 101 с массовым числом 256. Этот изотоп получен бомбардировкой изотопа элемента № 99 с массовым числом 253 альфа-частицами. Для элемента № 101 Сиборгом предложено наименование «менделевий» (Mv) в честь выдающегося русского учёного Д. И. Менделеева.

Интересно отметить, что новые трансурановые элементы образуют группу, аналогичную группе редких земель. Первым элементом этой группы является актиний, поэтому группа трансурановых элементов (вместе с торием и ураном) получила название «актинидов».

Обнаруженные трансурановые элементы оказались, как это и следовало ожидать, неустойчивыми. Они распадаются, образуя цепь радиоактивных превращений, аналогичных превращениям, совершающимся в семействах естественных радиоактивных элементов. Интересно отметить, что трансурановые элементы образуют новое радиоактивное семейство типа $4n+1$. Что это значит?

Ещё ранее было обращено внимание на то, что среди естественных радиоактивных элементов имеются изотопы, массовое число которых делится на 4, т. е. может быть представлено формулой $A=4n$. К таким изотопам относятся члены семейства тория. Изотопы семейства урана имеют несколько другие массовые числа, именно: у них массовое число A выражается формулой $A=4n+2$, где n — целое число (например, для $^{238}_{92}U$ $n=59$, для $^{226}_{88}Ra$ $n=56$). Изотопы семейства актиния имеют массовое число, выражающееся формулой $A=4n+3$, где n — целое число. Учёных давно удивляло отсутствие среди естественных радиоактивных изотопов таких, у которых массовое число могло быть выражено формулой $A=4n+1$, и вот оказалось, что такие изотопы находятся среди трансурановых элементов. В таблице VII мы приводим схему радиоактивного семейства $A=4n+1$, названного семейством нептуния.

Интересно отметить, что это семейство имеет не одного, а несколько родоначальников. Так, $^{241}_{94}Pu$ образует указанное радиоактивное семейство; $^{237}_{92}U$, получающийся из $^{238}_{92}U$ в результате реакции (n, $2n$), т. е. ядерной реакции, при которой нейтрон, попадая в ядро урана, вырывает оттуда два нейтрона, также может рассматриваться как родоначальник этого семейства. Исходным продуктом для образования этого семейства может быть торий. При облучении тория нейтронами образуется радиоактивный изотоп $^{233}_{90}Th$, испускающий бета-лучи. В результате двух последовательных бета-превращений из него возникает $^{233}_{92}U$, являющийся членом семейства нептуния. Родоначальником этого семейства может считаться кюрий 241, калифорний 249 и берклий 245.

Таблица VII

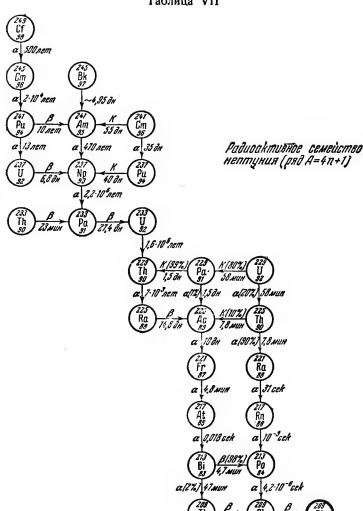
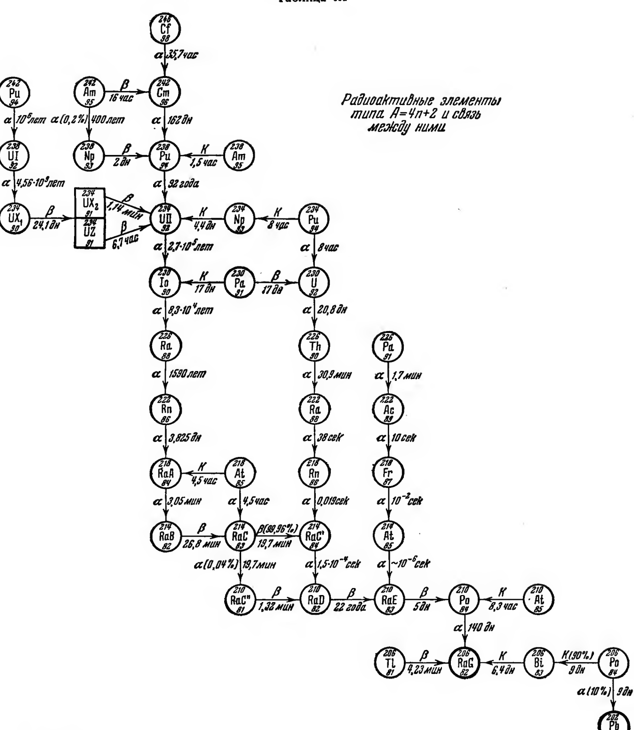

Радиоактивное семейство нептуния (ряд A=4n+1)
249 Cf 98
α 500 лет
245 Cm 96
245 Bk 97
α 2·10⁴ лет
~4,95 дн
241 Pu 94
β 10 лет
241 Am 95
K 55 дн
241 Cm 96
α 13 лет
α 470 лет
α 35 дн
237 U 92
β 6,8 дн
237 Np 93
K 40 дн
237 Pu 94
α 2,2·10⁶ лет
233 Th 90
β 23 мин
233 Pa 91
β 27,4 дн
233 U 92
1,6·10⁵ лет
229 Th 90
K(99%) 1,5 дн
229 Pa 91
K(80%) 58 мин
229 U 92
α 7·10³ лет
α(1%) 1,5 дн
α(20%) 58 мин
225 Ra 88
β 14,8 дн
225 Ac 89
K(10%) 7,8 мин
225 Th 90
α 10 дн
α(90%) 7,8 мин
221 Fr 87
221 Ra 88
α 4,8 мин
α 31 сек
217 At 85
217 Rn 86
α 0,018 сек
α 10⁻³ сек
213 Bi 83
β(98%) 4,7 мин
213 Po 84
α(2%) 47 мин
α 4,2·10⁻⁶ сек
209 Tl 81
β 2,2 мин
209 Pb 82
β 3,32 час
209 Bi 83

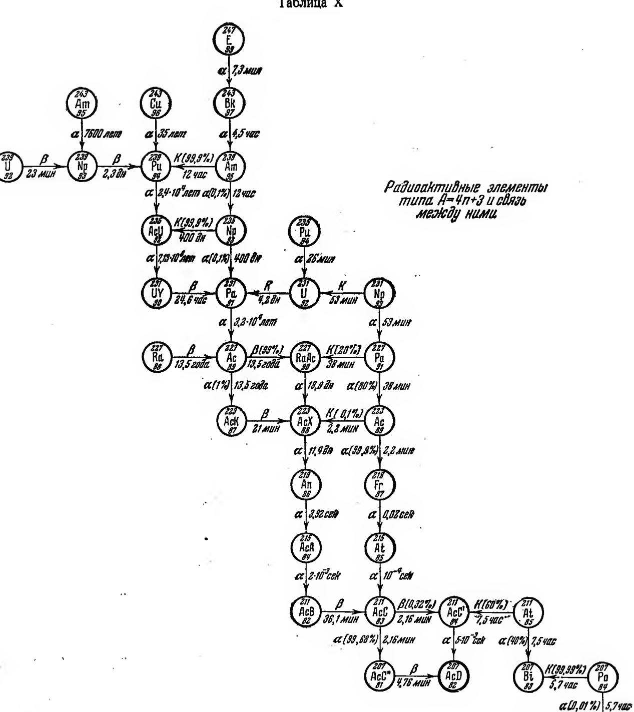
Таблица VIII

Таблица IX



М. И. Корсунский

Таблица X



Радиоактивные элементы типа A=4n+3 и связь между ними

Замечательным в радиоактивном семействе нептуния, изображённом в таблице VII, является наличие в нём побочных ветвей. Так, например, наряду с основной ветвью

$$^{229}_{91}Pa \rightarrow {}^{225}_{89}Ac \rightarrow {}^{221}_{87}Fr \rightarrow {}^{217}_{85}At \rightarrow {}^{213}_{83}Bi \rightarrow {}^{209}_{81}Tl$$

существует ещё ветвь

$$^{229}_{92}U \rightarrow {}^{225}_{90}Th \rightarrow {}^{221}_{88}Ra \rightarrow {}^{217}_{86}Rn \rightarrow {}^{213}_{84}Po \rightarrow {}^{209}_{82}Pb.$$

Отсутствие в радиоактивном семействе нептуния элементов с таким длинным периодом полураспада, как у урана и тория, объясняет, почему они не наблюдаются в природе.

Исследование трансурановых элементов дало возможность обнаружить не только существование нового радиоактивного семейства нептуния, но и значительно расширило наши сведения о радиоактивных рядах $A=4n$, $A=4n+2$ и $A=4n+3$. Оказалось, что естественные радиоактивные ряды, изображённые в таблицах I—III (стр. 52—54), представляют только части соответственных радиоактивных семейств, которые в действительности более богаты, имеют многих родоначальников (так же как и семейство нептуния) и много побочных ветвей. Полная картина радиоактивных изотопов, входящих в семейства тория, урана и актиния, и их взаимных превращений дана в таблицах VIII, IX и X. Собственно их уже нельзя называть семействами урана, тория и актиния, так как превращения начинаются с элементов с бо́льшими атомными номерами (берклием, калифорнием, эйнштейнием). Как видно из этих таблиц, радиоактивные семейства стали столь многочисленны и столь разветвлены, что образное выражение «радиоактивное семейство» и тем более «радиоактивный ряд» к ним уже не подходят (скорее уж следует употребить выражения «радиоактивный род» или «радиоактивное племя»). Поэтому таблицу VIII мы назвали «Радиоактивные элементы типа $A=4n$ и связь между ними». Аналогичные названия даны и таблицам IX и X.

В этих таблицах мы видим примеры очень интересных разветвлений. Так, например (таблица IX), $^{234}_{94}Pu$ распадается двояким образом: часть его ядер, распадаясь, испускает альфа-частицу и превращается в изотоп уран 230, а другая часть путём K-захвата — в изотоп нептуний 234. Оба ядра, и $^{230}_{92}U$ и $^{234}_{93}Np$, претерпевают много различных

превращений, которые в общем приводят к одному элементу $^{214}_{84}RaC'$. Вот превращения, соответствующие этому длинному разветвлению:

$$^{234}_{94}Pu \longrightarrow {}^{230}_{92}U \longrightarrow {}^{226}_{90}Th \longrightarrow {}^{222}_{88}Ra \longrightarrow {}^{218}_{86}Rn \longrightarrow {}^{214}_{84}RaC';$$

другая ветвь превращений ещё более сложна:

$$^{234}_{94}Pu \longrightarrow {}^{234}_{93}Np \longrightarrow {}^{234}_{92}UII \longrightarrow {}^{230}_{90}Io \longrightarrow {}^{226}_{88}Ra \longrightarrow {}^{222}_{86}Rn \longrightarrow$$
$$\longrightarrow {}^{218}_{84}RaA \longrightarrow {}^{214}_{82}RaB \longrightarrow {}^{214}_{83}RaC \longrightarrow {}^{214}_{84}RaC'.$$

Ядерные осколки и их энергия

Появление среди продуктов превращения урана изотопов брома, криптона, бария и лантана свидетельствовало о делении ядра урана на две части. Среди осколков от деления урана найдены изотопы почти всех элементов средней части таблицы Менделеева. Любопытно, что среди этих изотопов встречаются и такие, массовые числа которых значительно больше, чем массовое число устойчивых изотопов. Так, например, наиболее тяжёлый устойчивый изотоп теллура имеет массовое число 130, а среди осколков находят изотопы теллура с массой 131, 132, 133, 134, 135. Устойчивый изотоп иода имеет массовое число 127, а среди осколков находятся изотопы иода с массовым числом от 129 до 137. Такие тяжёлые изотопы не могут быть образованы превращением устойчивых ядер, и если бы не происходило деления ядер, то мы не сумели бы ознакомиться со свойствами таких ядер.

Конечно, не все осколки появляются одинаково часто. На рис. 51 приведена кривая, характеризующая вероятность деления ядра урана 235 на те или другие осколки. На этой кривой по оси абсцисс отложено массовое число осколков, а по оси ординат — процентное содержание их в логарифмическом масштабе.

Приведённая кривая показывает, что среди осколков встречаются изотопы с массовым числом от 72 до 160. Наиболее часто при делении урана 235 образуются осколки с массовыми числами от 90 до 100 и от 135 до 145. Кривая, изображённая на рис. 51, позволяет разбить осколки на две группы — «лёгкие осколки» и «тяжёлые осколки». Любопытно, что среди осколков редко встречаются такие, массо-

вое число которых равно 116—120. На такие осколки приходится как раз минимум кривой рис. 51. Это значит, что

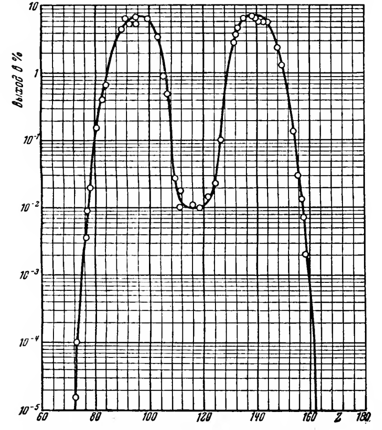


Рис. 51. Кривая распределения массовых чисел осколков.

уран 235 крайне редко делится на две равные части. Вероятность такого деления порядка 10^{-4}. Большей частью уран 235 делится на неравные осколки — один тяжёлый и один лёгкий.

Деление урана на два осколка является наиболее часто встречающимся процессом деления. Зарегистрированы, од-

нако, случаи, когда уран делится не на два осколка, а на три. В отдельных случаях обнаружено деление ядра урана даже на четыре осколка.

Выше мы указывали, что осколки, образующиеся при делении урана, должны обладать большой энергией. Как велика эта энергия и как её можно измерить?

Очевидно, что если образующиеся осколки будут обладать большой энергией, то, несмотря на большую массу, они будут иметь большую начальную скорость и, следовательно, смогут пробежать в воздухе некоторый заметный путь. Двигаясь, осколок будет производить громадную ионизацию, в десятки раз превышающую ионизацию, производимую альфа-лучами.

То, что образующиеся при делении осколки могут пробегать в веществе заметный путь, обнаружили Жолио-Кюри, Ферми и ряд других исследователей. Жолио-Кюри обнаружил это следующим путём. Он стал собирать осколки, вылетающие из урана, на бакелитовую пластинку, помещённую вблизи урана. О том, что на пластинку попадали осколки от деления урана, Жолио судил по радиоактивным превращениям, которые происходят с осколками, застрявшими в пластинке. Нерадиоактивная до приближения к урану пластинка вскоре становилась радиоактивной.

Существование значительного пробега у осколков можно наблюдать на снимках, сделанных с камерой Вильсона. На рис. XL, помещённом в конце книги, приведён один из таких снимков, на котором отчётливо видны следы осколков, образовавшихся при делении урана. Для получения этого снимка камера была перегорожена крупной сеткой, на которой помещалась тонкая плёнка, содержащая окись урана, а затем облучена нейтронами. В результате облучения произошло деление урана. Получившиеся осколки и образовали два длинных следа, которые отчётливо видны в правой части фотографии. Множество других более коротких следов, имеющихся на этом снимке, возникло при столкновениях нейтронов с атомами (вернее, с ядрами) водорода, входящего в состав паров, наполняющих камеру Вильсона.

Наблюдая за осколками, попадающими на пластинку, Жолио-Кюри заметил, что осколки попадают на пластинку и в том случае, если пластинка не непосредственно лежит на уране, а удалена от него на некоторое расстояние, или если

между пластинкой и ураном помещена тонкая целлофановая фольга.

Это обстоятельство позволило осуществить интересный опыт. В самом деле, если осколки способны проходить через некоторый слой вещества, то, взяв настолько тонкий слой урана, чтобы все образовавшиеся осколки его покинули, мы уже не обнаружим в нём после бомбардировки радиоактивность, создаваемую осколками. Радиоактивность такого слоя будет обусловлена только теми веществами, которые образуются без деления урана, т. е. путём захвата нейтрона, если уран облучался медленными нейтронами. Это и будут, следовательно, уран 239 и продукты его распада, т. е. трансураны. Этот опыт подтвердил образование урана 239 и последующих продуктов его распада.

Опыты Жолио-Кюри показали, что осколки способны пробегать в воздухе до 2,1 *см* и что, следовательно, они обладают большой энергией. Возникла важная задача — измерение энергии осколков. Главное затруднение состояло в том, что сам уран радиоактивен и испускает альфа-лучи. С осколками тоже происходят радиоактивные превращения. При каждом таком превращении появляются бета-частицы большой энергии. Надо было не запутаться во всей этой картине и найти надёжный способ отделять осколки от других лучей, возникающих при превращении урана.

Такой способ был найден. Воспользовались тем обстоятельством, что осколки, заряд которых доходит до 20 единиц, производят гораздо более сильное ионизирующее действие, чем электроны и альфа-лучи. Была взята маленькая ионизационная камера, соединённая с мощным усилителем, который позволял измерить непосредственно ионизационный ток, образуемый в камере, когда в неё попадала частица. Настраивая усилитель на разные степени усиления, можно было добиться того, чтобы вся установка не реагировала, когда в ионизационную камеру попадала альфа-частица (понятно, что действие электронов и подавно не сказывалось). Однако когда в ионизационную камеру попадала частица, ионизирующая во много раз сильнее альфа-частиц, то возникающий при этом ионизационный ток усиливался усилителем до легко обнаруживаемой величины.

Измерения, проделанные с этой установкой, показали, что когда возле такой ионизационной камеры помещался

уран, то при облучении его нейтронами наблюдались импульсы тока, соответствующие попаданию в ионизационную камеру сильно ионизирующей частицы. По величине импульсов можно было заключить, что ионизирующая способность осколков в десятки раз больше, чем ионизирующая способность альфа-частиц. Именно благодаря этому обстоятельству и можно было регистрировать ядерные осколки на фоне альфа- и бета-частиц. Если усилитель, усиливающий ток в ионизационной камере, сделать пропорциональным, т. е. таким, чтобы ток на выходе был пропорционален току в ионизационной камере и, кроме того, сделать размер ионизационной камеры таким, чтобы осколок в ней полностью затормозился, то тогда возможно определить и энергию осколка. В самом деле, определив силу тока на выходе усилителя и зная коэффициент усиления, мы определим силу тока в ионизационной камере. Последний будет определяться тем количеством ионов, которое осколок образует на своём пути. Зная число ионов и зная, что на образование одной пары ионов нужно затратить энергию, равную 33 электрон-вольтам, нетрудно сосчитать энергию осколка.

Произведённые тщательные измерения показали, что энергия осколка громадна даже по ядерным масштабам. Энергия различных осколков оказалась несколько различной, но всё же порядка многих десятков миллионов электрон-вольт, достигая у некоторых осколков сотни миллионов электрон-вольт. Эта цифра кажется ещё более поразительной, если мы примем во внимание, что при делении урана образуется два осколка и что каждый из этих осколков радиоактивен и испытывает целый ряд радиоактивных превращений. В процессе этих превращений также выделяется значительная энергия, равная нескольким десяткам миллионов электрон-вольт.

Приведём примерный баланс энергии деления, происходящего с ядром урана 235. Будем выражать энергию в единицах массы. Полная энергия деления слагается из нескольких частей:

масса осколков (включая нейтроны)	234,8
масса электронов, образующихся в результате радиоактивного распада осколков	0,005
кинетическая энергия осколков	0,172
энергия излучения	0,023
Всего	235

В свою очередь энергия излучения слагается из энергии гамма-лучей (около четверти всего количества излучённой энергии), кинетической энергии электронов, на долю которой приходится также четверть всего количества энергии излучения, и энергии нейтрино, на долю которых приходится почти половина всей излучённой энергии.

Приведённые данные показывают, что при делении ядра урана освобождается огромная энергия — около 200 миллионов электрон-вольт.

Вторичные нейтроны

Энергия, выделяющаяся при делении урана, поражает своей величиной. Очевидно, что мы имеем дело с явлением, которое может сыграть значительную роль в истории человечества и без сомнения играет громадную роль в природе. В полной мере, однако, значение этой цифры — 200 000 000 электрон-вольт на одно деление ядра урана — сделалось понятным в свете обнаружившегося вскоре нового явления. Мы имеем в виду возникновение вторичных нейтронов в процессе деления ядер.

Поясним суть дела. Известно, что особенностью тяжёлых ядер является то, что число нейтронов в них значительно превышает число протонов. Так, например, в ядре наиболее распространённого изотопа урана $^{238}_{92}U$ на 92 протона приходится 146 нейтронов. Это значит, что на один протон приходится почти 1,6 нейтрона. У элементов, находящихся в средине таблицы Менделеева, соотношение между числом протонов и нейтронов совсем иное. У брома, например, на 35 протонов приходится всего лишь 45 нейтронов. Это значит, что на один протон приходится около 1,3 нейтрона. Сопоставляя соотношение числа нейтронов и протонов для урана и для брома, мы естественно должны придти к заключению о том, что в осколках, образующихся при делении урана, должен быть избыток нейтронов.

Поясним это более подробно следующим примером. Допустим, что уран 238 поделился на две равные части. Каждая из этих частей будет иметь заряд, равный 46, и массовое число, равное 119. Посмотрев в таблицу изотопов стабильных ядер, мы увидим, что атомному номеру 46 отве-

чает элемент палладий. Палладий имеет несколько устойчивых изотопов. Массовое число самого тяжёлого из них равно 110. Таким образом, в каждой из половинок урана будет находиться по крайней мере 9 лишних нейтронов.

Из предыдущей главы мы знаем, что должно происходить, когда в ядре имеется избыток нейтронов. В этом случае один из нейтронов превратится в протон, а в пространстве, окружающем ядро, появится свободный электрон. Произойдёт, следовательно, бета-распад.

Конечно, одного бета-распада будет недостаточно, чтобы избыток нейтронов, имеющийся внутри осколка, исчез. В частности, в рассматриваемом примере с палладием потребовалось бы по крайней мере четыре бета-превращения, чтобы изотоп палладий 119 превратился в устойчивый изотоп. В самом деле, ближайшим к палладию элементом, имеющим массовое число 119, является олово. Атомный номер олова 50, поэтому для превращения палладия 119 в олово 119 потребуется четыре бета-превращения. Четыре нейтрона при этих превращениях превратятся в четыре протона. Рассмотренный нами пример поясняет, почему с осколками, образующимися при делении урана, происходит целая цепь последовательных бета-превращений: они возникают в результате большого избытка нейтронов у осколков, образующихся при делении.

Правда, обычно уран распадается на две неравные части; чаще всего при делении образуются немного отличные осколки с массовыми числами около 140 (один осколок) и 100 (другой осколок). Дело, однако, от этого не меняется. Избыток нейтронов в осколках оказывается значительным, и осколки превращаются в устойчивые изотопы путём ряда бета-превращений. Итак, характерной особенностью образующихся осколков является избыток нейтронов в них.

Естественно, может возникнуть следующий вопрос: действительно ли все избыточные нейтроны превращаются в протоны. Не происходит ли так, что в процессе деления некоторое количество избыточных нейтронов окажется вне ядер? Этот важный вопрос подвергся исследованию многими учёными. Очень скоро был получен ответ. Он оказался положительным. Действительно, при делении ядер

возникают свободные или, как их называют, вторичные нейтроны.

Это открытие имело огромное значение, оценить которое мы сможем в следующей главе.

А сейчас познакомимся с некоторыми деталями образования вторичных нейтронов.

Прежде всего нас будет интересовать, сколько нейтронов возникает при делении. Мы знаем, что при делении урана получаются различные осколки. Это значит, что не все ядра урана делятся одинаково: одни ядра делятся по одному способу, другие — по другому. Поэтому и число вторичных нейтронов, образующихся при различных способах деления ядра урана, будет разное. Однако важно было определить среднее число вторичных нейтронов, возникающих при делении одного ядра урана. Сколько же в среднем образуется нейтронов на одно деление ядра урана? Этот вопрос крайне интересовал учёных. Однако установление точного числа нейтронов, образующихся в среднем при делении ядер урана, потребовало большой и кропотливой работы. В результате этой работы было выяснено, что среднее число нейтронов, приходящееся на одно деление ядра урана 235, равно $2{,}5 \pm 0{,}1$. При делении ядра плутония 239 образуется ещё больше нейтронов. Среднее их число на одно деление ядра плутония 239 составляет $3{,}0 \pm 0{,}1$. Существенное значение имеет то, что число вторичных нейтронов оказалось больше единицы. Если бы среднее число вторичных нейтронов, приходящихся на один распад, было меньше единицы, то ценность этого открытия и интерес к нему были бы совсем иными. Но так как число вторичных нейтронов оказалось больше единицы, интерес к этому открытию стал необычайным.

Учитывая возникновение при делении ядер вторичных нейтронов, можно процесс деления изобразить схемой, представленной на рис. 52 и изображающей деление ядра плутония 239.

Исследование вторичных нейтронов, образующихся при делении ядер, позволило установить ещё одно очень интересное и практически важное явление. Оказалось, что если облучить уран нейтронами, а затем убрать источник нейтронов, то в течение некоторого времени после удаления источника можно наблюдать появление вторичных ней-

тронов. Эти нейтроны, наблюдающиеся после прекращения облучения урана, называются запаздывающими нейтронами. Подробное изучение явления запаздывания нейтронов показало, что 0,2—1% нейтронов, возникших при делении урана, запаздывает на 0,1 секунды и 0,07% нейтронов запаздывает на минуту. При интенсивном облучении урана удалось наблюдать запаздывающие нейтроны спустя 13 минут после окончания облучения.

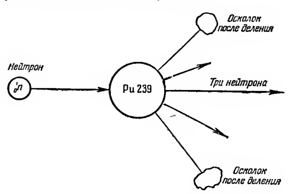


Рис. 52. Схема деления ядра плутония 239.

Причина появления запаздывающих нейтронов ясна. Запаздывающие нейтроны появляются в результате образования, в процессе радиоактивных превращений осколков, таких ядер, в которых содержится избыток энергии, достаточный для «испарения» нейтронов. Поскольку такие ядра возникают в результате радиоактивного превращения, мы наблюдаем нейтроны в течение некоторого времени *после* деления ядра и образования осколков.

Для примера рассмотрим превращения ядра ${}^{87}_{35}Br$. Как видно из схемы, представленной на рис. 53, это ядро может распадаться тремя различными способами. Во всех трёх типах распада вылетает бета-частица. Однако в каждом типе распада выделяется различное количество энергии. Вследствие этого в образующихся в результате распада ${}^{87}_{35}Br$ ядрах ${}^{67}_{36}Kr$ будет различный запас энергии. Ядра ${}^{67}_{36}Kr$ с наибольшим запасом энергии излучают запаздывающие нейтроны и превращаются в ${}^{86}_{36}Kr$. Ядра ${}^{87}_{36}Kr$ с

наименьшей энергией являются нормальным невозбуждённым состоянием изотопа криптона 87. Для испарения нейтрона из таких ядер, так же как и из ядер $^{87}_{36}$Kr с промежу-

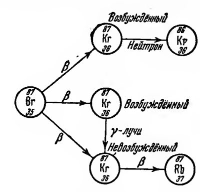


Рис. 53. Схема превращений ядра $^{87}_{35}$Br.

точной энергией (возбуждённое состояние), нехватит энергии, поэтому в них переход

$$^{87}_{36}\mathrm{Kr} \longrightarrow {}^{86}_{36}\mathrm{Kr} + {}^{1}_{0}n$$

не происходит.

Изотоп $^{87}_{36}$Kr, находящийся в невозбуждённом состоянии, радиоактивен. Он превращается в устойчивый изотоп $^{87}_{37}$Rb путём бета-распада.

Тепловые нейтроны и деление урана

В первоначальных опытах по делению ядер урана пользовались нейтронами большой энергии. В связи с этим важно было установить, какой энергии нейтроны могут вызывать деление. Есть ли, например, какая-нибудь граница для энергии нейтронов, способных вызвать деление, или, быть может, нейтрон любой энергии, даже самой малой, проникнув в ядро, в состоянии вызвать деление?

Для того чтобы ответить на этот вопрос, надо было прежде всего выяснить, как действуют тепловые нейтроны, могут ли и они вызвать деление ядер урана. Как только соответ-

ствующие опыты были поставлены, сразу же было обнаружено, что тепловые нейтроны способны вызывать деление урана. Более того, они оказались значительно более эффективными, нежели быстрые нейтроны. Отметим, что приведённые выше данные о среднем числе нейтронов на одно деление ядер урана 235 и плутония 239 относятся именно к случаю деления, возбуждаемого тепловыми нейтронами.

Когда было установлено, что тепловые нейтроны способны возбуждать деление урана так же, как и нейтроны с большой энергией, и что, следовательно, для деления важна не энергия нейтронов, а самый факт проникновения нейтрона в ядро, возник новый вопрос. Известно, что уран представляет собой не однородное вещество, а смесь трёх изотопов — урана 238, урана 235 и урана 234. Все ли эти ядра делятся или, может быть, деление происходит только у какого-нибудь одного изотопа? Для решения этого вопроса нужно было отделить изотопы урана друг от друга. Такое разделение изотопов было осуществлено при помощи масс-спектрографа. Количество отделённых изотопов урана было очень малым: всего лишь 0,03 микрограмма урана 235 и 4 микрограмма урана 238. Но и этого оказалось вполне достаточно, чтобы показать, что тепловые нейтроны делят ядра урана 235, а уран 238, составляющий основную массу урана, под действием тепловых нейтронов не делится. Чтобы полностью составить представление о делении урана, оставалось определить поведение изотопа урана 238 при облучении его быстрыми нейтронами. Опыты показали, что под действием быстрых нейтронов делятся также и ядра урана 238.

Предельное значение энергии, начиная с которой нейтроны оказываются в состоянии вызвать деление урана 238, было определено работами советских физиков Г. Н. Флёрова и К. А. Петржака. По их измерениям деление урана 238 могут вызвать только те нейтроны, энергия которых больше одного миллиона электрон-вольт, нейтроны же меньших энергий не могут возбудить деление урана 238.

Что же произойдёт, если нейтрон меньшей энергии проникнет внутрь ядра урана 238? Это приведёт к образованию нового радиоактивного изотопа урана — уран 239, который распадается нормальным путём с испусканием бета-лучей.

Бета-распад этого изотопа приводит к образованию трансурановых элементов — нептуния и плутония.

Итак, изотопы урана 235 и 238 ведут себя различно по отношению к делению. Ядра изотопа 235 делятся под действием и медленных и быстрых нейтронов. Ядра изотопа 238 делятся только под действием нейтронов с энергией, большей одного миллиона электрон-вольт.

Рассказывая о наблюдениях над делением изотопа урана, мы всё время говорим о делении урана 238 или урана 235. Но ведь деление происходит тогда, когда нейтрон проникает внутрь ядра. Следовательно, в действительности мы наблюдаем деление не ядер урана 238 и 235, а деление ядер урана 239 и 236, ибо после захвата нейтрона уран 235 преобразуется в уран 236, а уран 238 в уран 239. Итак, деление происходит с ядрами изотопов урана 236 и урана 239.

Спонтанное деление ядер урана 235

Г. Н. Флёров и К. А. Петржак, впервые измерившие энергию, необходимую для деления урана 239, решили выяснить более детально поведение изотопа урана 235.

Чем меньше в ядре находится нейтронов, тем меньше будет доля энергии, происходящей от сил притяжения между ядерными частицами, в полной энергии ядра. В ядре изотопа урана 236 столько же протонов, сколько и в ядрах изотопов урана 235 и 238, следовательно, действие отталкивательных сил между зарядами у всех трёх ядер одинаково. Число нейтронов у всех трёх изотопов разное. Значит, и роль сил притяжения у них также различна. У изотопа урана 239 число нейтронов наибольшее, следовательно, и действие сил притяжения будет у него наибольшим. Благодаря этому, как мы знаем, ядро урана 239 само не делится; необходимо, чтобы это ядро получило достаточный для деления избыток энергии. Такой избыток энергии и приносит с собой быстрый нейтрон, проникая в ядро урана 238.

Изотоп урана 236 делится тотчас же после образования. Это значит, что избыток энергии, создающийся в этом ядре при его образовании (в результате захвата нейтрона ядром урана 235), уже достаточно велик, чтобы процесс деления произошёл. Следовательно, в ядре урана 236 действие сил притяжения не намного превышает действие сил отталки-

вания. Изменение соотношения между действием сил притяжения и отталкивания произошло потому, что в ядре урана 236 число нейтронов меньше, чем в ядре урана 239.

Очевидно, что у ядер изотопа уран 235, имеющих ещё меньшее число нейтронов, чем у изотопа уран 236, действие сил притяжения будет ещё меньше превосходить силы отталкивания. В связи с этим возникает вопрос: не может ли уран 235 делиться самопроизвольно, без какого-либо облучения нейтронами? Можно было ожидать, что такое деление происходит, но с малой вероятностью. Это значит, что число ядер урана 235, делящихся в каждый момент времени, будет невелико, поэтому такое деление могло оставаться незамеченным. Быть может, самопроизвольное деление ядер урана 235 обнаружится, если поставить специальные опыты в условиях, при которых можно было бы регистрировать очень малое число осколков.

Такие опыты были поставлены Флёровым и Петржаком. Они использовали специальную ионизационную камеру, состоящую из многих пластин, покрытых окисью урана. Общая поверхность, занятая окисью урана, составила 1000 *см*^{2}. Такая большая поверхность понадобилась для того, чтобы наблюдать появление осколков у возможно большего количества урана. Ионизационная камера соединялась с усилителем, как и в других подобных установках для исследования осколков, однако разрешающая способность усилителя Флёрова и Петржака была значительно большей, чем у обычных усилителей, ибо при большой поверхности урана в камеру попадало большое количество альфа-частиц, и было необходимо предотвратить наложение ионизации от нескольких альфа-частиц одновременно.

Наблюдения Флёрова и Петржака установили появление осколков у урана, не облучённого нейтронами. Правда, число этих осколков было крайне незначительно. Происходило всего шесть случаев деления в течение одного часа. Если учесть количество урана, взятое для опыта, то можно было сделать следующее заключение: если принять, что самопроизвольное деление урана происходит именно с изотопом уран 235, то время, в течение которого разделится половина взятого количества урана 235, составит 10^{14}—10^{15} лет. Так медленно происходит самопроизвольное деление урана. Не исключено, однако, что предположение о

том, что делится именно изотоп уран 235, окажется неправильным; ведь в смеси изотопов урана имеется ещё изотоп 234, в ядрах которого содержится ещё меньше нейтронов, чем в ядрах урана 235. Может быть, деление происходит с ядрами этого изотопа. В этом случае период полураспада будет несколько меньше: 10^{12}—10^{13} лет*).

Основные явления, связанные с делением ядер, изучались на уране. Однако естественно, что исследования должны были выяснить, является ли уран единственным элементом, ядра которого могут делиться, или существуют ещё другие вещества, обладающие подобными свойствами. Прежде всего подверглись исследованию элементы с наибольшим атомным номером. Это и понятно. Ведь в ядрах этих элементов содержится больше всего протонов. Значит, у этих ядер влияние отталкивательных сил проявится наиболее сильно. Поэтому естественно ожидать деления именно у этих элементов. Поиски оказались успешными. Деление было обнаружено у тория, иония и протактиния. Оно наблюдалось в том случае, если все эти вещества подвергались облучению быстрыми нейтронами. Тепловые нейтроны вызвать деление этих ядер не могли.

Так, у тория 233 деление вызывается нейтронами, энергия которых превосходит 1,7 миллиона электрон-вольт. Протактиний 232 делится под действием нейтронов с энергией свыше 100 000 электрон-вольт. Деление иония вызывается нейтронами с энергией, большей 1,2 миллиона электрон-вольт. Деление ядер может возбуждаться не только нейтронами, но также и дейтронами с энергией свыше 8 миллионов электрон-вольт. Было также установлено, что под действием альфа-частиц с энергией в 400 миллионов электрон-вольт и дейтронов с энергией 200 миллионов электрон-вольт происходит деление висмута, свинца, таллия, платины и тантала.

Что касается тепловых нейтронов, то, кроме урана 235, под действием их делятся плутоний 239 и уран 233, получающийся при облучении тория 232 нейтронами.

---

*) В настоящее время имеются данные о том, что спонтанное деление происходит и с ядрами урана 238. Скорость этого деления очень мала: около 20 распадов в час на один грамм урана 238. Соответствующий период полураспада составляет примерно 10^{17} лет.

ГЛАВА XII

ЦЕПНЫЕ ЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Цепная реакция

В предыдущей главе мы познакомились с явлением деления атомных ядер. Два замечательных свойства этого явления сразу же обратили на себя внимание.

1) При делении ядер выделяется громадная энергия — 200 миллионов электрон-вольт на каждое разделившееся ядро.

2) Деление ядер сопровождается вылетом вторичных нейтронов. Число вторичных нейтронов, образующихся при делении одного ядра, больше единицы.

Второе свойство поставило перед учёными выдающуюся проблему — создание цепной реакции.

Разберём сначала идеализированную схему. Предположим для определённости, что при делении ядра образуются два новых нейтрона. Предположим далее, что каждый из нейтронов попадает обязательно в какое-нибудь из ядер урана и вызывает деление этого ядра.

Что же произойдёт, если при этих условиях один единственный первичный нейтрон попадает в ядро урана?

Ядро разделится и в результате деления образуется два новых нейтрона. Эти нейтроны в свою очередь захватятся ядрами урана, которые при этом разделятся, образовав четыре новых нейтрона. Четыре нейтрона вызовут деление четырёх ядер урана. Результатом этого будет восемь нейтронов. Количество нейтронов, а вместе с ними и количество делящихся ядер будет непрерывно возрастать.

Рассмотренный идеализированный случай представляет собой ускоряющуюся цепную реакцию. Название «цепная» для описанного выше превращения позаимствовано из химии, где под цепной реакцией подразумевают такую реак-

цию, продукты которой могут вновь вступать в соединение с исходными продуктами. Благодаря этому обстоятельству реакция непрерывно развивается.

Так и в нашем случае. Выброшенный при делении ядра урана нейтрон может проникнуть в другое ядро урана и, следовательно, вновь вызвать деление ядра. При этом снова образуются нейтроны. Эти последние могут опять проникнуть в ядра урана и снова вызвать деление и т. п. Получается цепная ядерная реакция.

Конечно, рассмотренный выше идеализированный случай достаточно сильно отличается от действительности. На самом деле всё обстоит значительно сложнее.

Во-первых, не всякий нейтрон, проникающий в ядро урана, вызывает деление этого ядра. Мы знаем, например, что деление ядер изотопа уран 238 могут вызывать нейтроны с энергией, не меньшей миллиона электрон-вольт. Если энергия нейтрона меньше, то он поглощается ураном 238, не производя никакого деления. Из 650 ядер урана 235, захвативших тепловые нейтроны, испытают деление только 549, т. е. в этом случае деление происходит в 85% ядер, захвативших нейтрон. У плутония 239 этот процент ещё ниже: деление происходит лишь с 63% ядер, захвативших тепловой нейтрон. Остальные ядра испытывают радиоактивные превращения, в результате которых свободные нейтроны не возникают. Поэтому развитие цепной реакции определяется собственно не средним числом нейтронов, образующихся при делении ядра, а «воспроизводимостью» нейтронов — числом возникающих в результате делений нейтронов, отнесённым к одному поглощённому ядром нейтрону. «Воспроизводимость» нейтронов у урана 235 оказывается более высокой, чем у плутония 239, а именно у урана 235 она равна 2,11, а у плутония 239 только 1,94.

Во-вторых, мы считали, что всякий нейтрон, возникший при делении, будет захвачен ядром урана. В действительности это не так. Нам хорошо известно, что вероятность захвата нейтрона ядром невелика. Нейтрон в состоянии пройти ещё значительные слои вещества, прежде чем он будет захвачен ядром. Вероятность захвата нейтрона ядром будет тем меньше, чем большей энергией обладают нейтроны.

Так как уран будет занимать какое-то вполне определённое конечное пространство, то всегда окажется так, что некоторое количество нейтронов покинет тот объём, где находится уран, и таким образом «выйдет из игры».

В-третьих, мы предполагали, что имеем дело с чистым ураном. Но ведь в действительности трудно получить чистое вещество; в нём обязательно будут какие-то примеси. Если этих примесей будет много или если эти примеси будут сильно поглощать нейтроны, то значительная часть нейтронов может быть захвачена ядрами атомов этих примесей и, таким образом, также окажется не в состоянии поддерживать деление ядер. Поэтому, хотя в процессе деления ядер образуется более чем один нейтрон, заранее нельзя было сказать, сможет ли развиваться цепная реакция. Общая картина процессов, происходящих в уране под действием нейтронов, дана на рис. 54.

Надо было разобраться во всех сложных явлениях, влияющих на развитие цепной реакции, и установить, при каких условиях она окажется возможной.

Развитию цепной реакции мешают три причины:

1) поглощение ураном 238 медленных нейтронов, не сопровождающееся делением;

2) вылет нейтронов через поверхность уранового блока наружу;

3) наличие примесей, особенно таких, которые сильно поглощают медленные и «тепловые» нейтроны.

Почему опасны примеси, поглощающие медленные нейтроны?

В предыдущей главе было показано, что деление ядер возбуждается тепловыми нейтронами гораздо более эффективно, чем быстрыми. Но ведь тепловые нейтроны действуют только на изотоп уран 235 и не действуют на изотоп уран 238.

Однако в уране изотопа 235 содержится в 140 раз меньше, чем изотопа 238, тем не менее действие тепловых нейтронов оказывается настолько сильным, что оно превосходит действие быстрых нейтронов на ядра урана 238, хотя их в 140 раз больше, чем ядер урана 235.

Значит, главную роль в делении урана играют тепловые нейтроны, действующие на уран 235; они-то и будут играть основную роль в развитии цепной реакции. Вследствие

этого особенно опасными являются примеси, способные поглощать медленные и тепловые нейтроны.

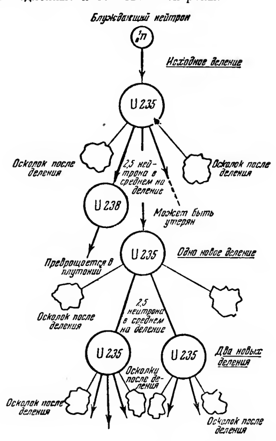


Рис. 54. Схема процессов, происходящих в уране при облучении его нейтронами.

Если роль медленных и тепловых нейтронов так велика, то целесообразно превращать все быстрые нейтроны в медленные. Мы знаем, что для замедления нейтронов надо пропустить их через достаточный слой лёгких веществ. Быстрее всего замедляет нейтроны водород. Если мы смешаем

водородосодержащее вещество (вода или парафин) с ураном, то в этой смеси водород будет замедлять нейтроны. Медленные нейтроны будут поглощаться ураном 235 и вызывать деление ядер.

Пусть при делении одного ядра (например, урана 235), вызванном захватом теплового нейтрона, образовалось n вторичных нейтронов. В процессе замедления часть этих нейтронов исчезнет — поглотится ядрами урана 238 и различными примесями, часть выйдет наружу.

Останется какая-то доля от первоначального числа нейтронов. Обозначим эту долю числом p (p — правильная дробь: если при замедлении поглощается, например, одна треть нейтронов, то останется две трети; в этом случае p будет равно $^2/_3$). Итак, из n нейтронов, образовавшихся при делении ядра, np нейтронов сделаются тепловыми, а $n(1-p)$ пропадут при замедлении.

Но не все замедлившиеся нейтроны попадут в ядра урана 235. Некоторые из них будут захвачены тем же ураном 238 или примесями, в том числе и ядрами замедлителя — вещества, тормозящего нейтроны (деление в этом случае не происходит), и только некоторые из медленных нейтронов попадут в ядра урана 235 и вызовут их деление *). Пусть доля таких случаев составит число k.

Итак, из первоначального числа нейтронов n, образовавшихся при делении урана, только npk нейтронов вызовут вторичное деление, следовательно, вместо одного нейтрона, попавшего в ядро урана 235, в результате процессов деления и замедления образовавшихся при делении нейтронов следующее деление уже вызывает npk нейтронов. Если $npk>1$, то число нейтронов, вызывающих деление, после каждого акта деления будет увеличиваться. Поэтому произведение npk называют «коэффициентом размножения нейтронов». Для осуществления цепной реакции нужно, чтобы нейтроны, возникшие в результате деления одного ядра урана, в свою очередь вызвали бы по крайней мере одно деление нового ядра урана. Следовательно, если коэффициент размножения npk будет больше единицы, цепная реакция будет развиваться, если же коэффициент размножения будет меньше единицы, то цепная реакция не осуществится.

*) Как мы указывали выше, деление происходит только в 85% случаев захвата нейтронов ураном 235.

Три величины (n, p и k), произведение которых должно быть больше единицы, решают, следовательно, судьбу цепной реакции. Можем ли мы влиять на значение этих величин? Можем, но не на все. Например, n — число нейтронов, образующихся при делении одного ядра урана 235, от нас не зависит. Это — вполне определённое число и изменить его мы не можем. Зато мы можем влиять на число k. k обозначает долю медленных нейтронов, вызывающих деление ядер урана 235. Остальные медленные нейтроны захватываются примесями, содержащимися в уране, примесями, содержащимися в замедлителе, ядрами самого замедлителя и ядрами урана 238. Чтобы увеличить число k, надо увеличить долю нейтронов, захватываемых ядрами урана 235. Для этого надо прежде всего удалить все примеси, особенно такие, как кадмий, бор и др., которые сильно поглощают тепловые нейтроны. Затем надо выбрать для замедления нейтронов такое вещество, которое само либо вовсе не поглощало бы нейтронов, либо поглощало их в небольшом количестве. Наилучший замедлитель нейтронов — водород — с этой точки зрения является не совсем подходящим, ибо он изрядно поглощает медленные нейтроны. Исследования различных веществ показали, что пригодными для цепной реакции замедлителями являются тяжёлый водород (дейтерий), графит и бериллий. Из этих трёх веществ графит легче всего получить в достаточном количестве и достаточной чистоты.

Можно влиять также и на число p. При выборе достаточно чистого урана и замедлителя нейтроны при замедлении могут теряться только благодаря поглощению ядрами изотопа урана 238 и путём утечки сквозь сосуд, содержащий уран с замедлителем. Уменьшить поглощение нейтронов ядрами урана 238 можно следующим способом.

Изучение поглощения нейтронов различных скоростей ураном 238 показало, что нейтроны разной энергии поглощаются ураном 238 различно. Наиболее «охотно» ядра урана 238 захватывают нейтроны, имеющие небольшую энергию, равную приблизительно 5 электрон-вольтам (так называемое резонансное поглощение). Нейтроны с энергией, большей тысячи электрон-вольт, так же как и нейтроны, энергия которых меньше 5 электрон-вольт, очень мало поглощаются ядрами урана 238. Если мы хотим, чтобы нейтроны мало

поглощались ураном 238, надо сделать так, чтобы при уменьшении энергии они быстро пробегали этот опасный участок от 1000 до 5 электрон-вольт, не встречаясь, по возможности, с ядрами урана 238.

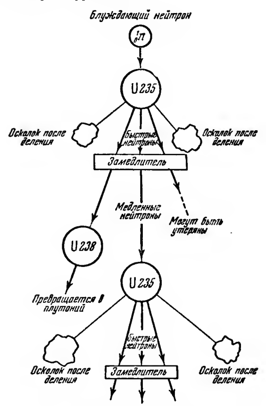


Рис. 55. Схема цепной реакции с замедлителем в неразделённом уране.

Для этого уран не распределяют равномерно с замедлителем по всему объёму котла, а помещают его в виде отдельных блоков, пространство между которыми заполняют замедлителем. При таком расположении большая часть быстрых нейтронов, образующихся при делении, замедлится до

энергии, меньшей 5 электрон-вольт, вдали от урана. Пройдя указанный опасный участок энергии, эти нейтроны при дальнейшем движении дойдут до урана и будут поглощены ядрами урана 235, которые при этом разделятся. Таким образом, наиболее выгодным является не перемешивание замедлителя с ураном, а расположение его в виде решётки, в которой уран и замедлитель чередуются друг с другом.

Дальнейшее увеличение числа p может быть достигнуто путём борьбы с утечкой нейтронов из сосуда, в котором находится уран с замедлителем. Уменьшать утечку нейтронов можно двумя способами.

1. Размеры сосуда с ураном надо сделать большими. Чем больше будет урана, тем меньше будет теряться нейтронов. А чем меньше будет теряться нейтронов, тем больше будет p и коэффициент размножения npk.

2. На границе сосуда, содержащего уран, следует поместить вещество, отражающее нейтроны. Тогда часть нейтронов, достигнув отражающих стенок, вернётся назад в сосуд с ураном.

При достаточной чистоте урана и замедлителя и при необходимых количествах их, исчисляемых тоннами, возможно добиться таких значений p и k, при которых коэффициент размножения сделается больше единицы. В этом случае начнётся цепная реакция.

Схема цепной реакции с замедлителем приведена на рис. 55.

Ядерный реактор

Устройство, в котором осуществляется цепная ядерная реакция, получило название ядерного реактора или котла.

Урановый реактор представляет собой огромный сосуд, наполненный ураном и замедлителем и окружённый веществом, отражающим нейтроны. Рассмотрим в общих чертах, что будет происходить внутри уранового реактора.

Прежде всего о размерах реактора. Очевидно, что если помещённое в реактор количество урана будет недостаточным (уран будет занимать малый объём), то цепная реакция идти не может, ибо слишком много нейтронов будет уходить из реактора наружу. При увеличении объёма реактора отношение поверхности урана к его объёму будет уменьшаться (поверхность растёт пропорционально квадрату радиуса, а

объём — пропорционально кубу), поэтому доля уходящих нейтронов уменьшится. При некотором размере, который мы будем называть *критическим*, цепная реакция становится возможной, и реактор начинает действовать.

Итак, допустим, что мы взяли размеры реактора такими, при которых может развиваться цепная реакция. В этом случае число делящихся в секунду ядер будет непрерывно возрастать. Мы знаем уже, что при делении каждого ядра выделяется энергия, равная приблизительно 200 миллионам электрон-вольт. По мере увеличения числа делящихся ядер будет увеличиваться и выделяемая энергия. При достаточно большом числе делящихся ядер выделяемая энергия достигнет громадного значения. Этот процесс иллюстрирует таблица XI.

Таблица XI

Число ядер, делящихся в одну секунду	10^{16}	10^{17}	10^{18}	10^{19}
Выделяемая мощность в киловаттах (округлена)	300	3000	30 000	300 000

Принципиально такое мощное выделение энергии вполне осуществимо. Практически, однако, это оказывается делом весьма сложным, для осуществления которого приходится разрешить ряд больших и малых проблем.

1. Развивающаяся цепная реакция приводит к тому, что число делящихся ядер непрерывно растёт. Если мы желаем поддерживать число делений постоянным во времени, то нам надо уметь управлять ходом реакции — регулировать число делений по своему усмотрению.

Решение этой задачи таково: поскольку рост числа делений ядер обусловлен возрастанием числа нейтронов, то для регулирования надо суметь в определённый момент времени ввести в реактор дополнительный поглотитель нейтронов. Так как деление урана 235 вызывают главным образом тепловые нейтроны, то для регулировки поглощения нейтронов следует выбирать вещество, эффективно поглощающее тепловые нейтроны. Наиболее пригодными материалами оказались кадмий и бор.

Введение внутрь реактора этих веществ заметно нарушает условие развития цепной реакции, а при достаточном количестве этих веществ может существенно затормозить и даже вовсе прекратить её развитие. Очевидно, что это случится тогда, когда введённые в реактор кадмий или бор столь сильно уменьшат коэффициент k, что коэффициент размножения npk сделается меньше единицы.

На рис. 56 приведена схема реактора, поясняющая принцип его регулировки. Здесь A — пространство, в котором

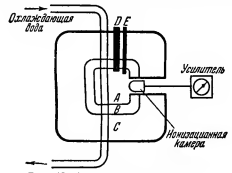


Рис. 56. Схема ядерного реактора.

находятся уран и замедлитель, B — отражатель для тепловых нейтронов. Наличие этого отражателя, возвращающего часть нейтронов, вышедших из реактора, обратно в реактор, способствует уменьшению критических размеров реактора. C — защитный слой, предохраняющий от действия излучения — нейтронов и гамма-лучей, выходящих в огромном количестве из рабочей части реактора.

Регулировка реактора осуществляется при помощи стержней D и E (из кадмия или бора). Стержень E (это может быть и группа стержней) может перемещаться внутри котла. Управление перемещением этого стержня осуществляется автоматически при помощи ионизационной камеры, связанной с усилителем. Когда цепная реакция разовьётся до желаемой степени, излучение, создающееся внутри реактора, возбудит в камере ионизационный ток определённой величины. Если развитие цепной реакции перейдёт желаемый предел, то ио низационный ток в камере

возрастёт выше допустимой величины. В этом случае срабатывает автомат, вдвигающий стержень E внутрь реактора. Продвижение стержня E внутрь реактора будет происходить до тех пор, пока излучение внутри реактора, а следовательно, и степень развития цепной реакции не достигнут нужной величины.

Назначением массивного кадмиевого стержня D является остановка реактора. Когда нужно остановить реактор, внутрь его вдвигают стержень D. Вследствие введения внутрь реактора большого количества кадмия коэффициент размножения нейтронов резко уменьшается, и цепная реакция сравнительно быстро затухает.

2. При делении ядер возникают осколки. Все осколки радиоактивны. Они испускают бета- и гамма-лучи. Учтём ещё, что при каждом делении испускаются и нейтроны. Таким образом, урановый реактор является источником разнообразных излучений. Среди этих излучений особое значение имеют нейтроны и гамма-лучи, так как они обладают большой проникающей способностью. Интенсивность этого излучения огромна. Для иллюстрации возьмём средний реактор на 10 000 киловатт. В таком реакторе в одну секунду будет испускаться около 10^{18} гамма-квантов и нейтронов. Это неизмеримо больше того, что когда-либо получалось до того времени. Поскольку гамма-лучи и нейтроны весьма сильно действуют на организм, необходимо устройство мощной защиты от этих излучений.

Первый советский урановый реактор

При строительстве первого советского реактора в качестве горючего был использован природный уран, состоящий в основном из урана 238. Изотопа урана 235, ядра которого делятся под действием тепловых нейтронов, в природном уране содержится немного — около 0,7%. Вследствие большого количества ядер урана 238 нейтроны захватываются ядрами горючей смеси (урана 235 и урана 238) преимущественно без последующего деления, поэтому воспроизводимость нейтронов оказывается небольшой. По точным измерениям, произведённым П. Е. Спиваком и Б. Г. Ерозолимским, на один тепловой нейтрон, захваченный ядрами урана, образуется в среднем всего лишь 1,337

нейтрона, т. е. для развития цепной реакции остаётся всего лишь 0,337 нейтрона.

Столь небольшой избыток нейтронов, получающийся при использовании в качестве горючего природного урана, делает задачу построения реактора особенно трудной. Достаточно было потерять в процессе замедления одну четверть возникающих нейтронов, как развитие цепной реакции сделалось бы невозможным. Поэтому нужно было всемерно уменьшить потери нейтронов, добиться возможного приближения p и k к единице с тем, чтобы удовлетворить условию $npk=1$, даже при $n=1,337$.

Как уже указывалось ранее, для увеличения коэффициента p (уменьшения потерь нейтронов при их замедлении), надо пользоваться не однородной смесью урана и замедляющего вещества, а придавать им своеобразную решетчатую структуру, в которой уран и замедлитель чередуются. Замедлителем был графит, который удаётся хорошо очистить от всех примесей, активно захватывающих нейтроны. Реактор складывали из графитовых кирпичей размером $100 \times 100 \times 600$ *мм*³. В кирпичах, предназначенных для ядерного горючего, просверливались отверстия на расстоянии 200 *мм* друг от друга. В эти отверстия закладывались блоки из металлического урана диаметром 30—40 *мм*.

Для предотвращения утечки нейтронов пришлось взять большое количество урана и графита. Первый реактор начал работать после того, как в него было загружено 45 *т* урана. Количество замедлителя составило несколько сот тонн. Для уменьшения утечки нейтронов решётка из урана и графита выкладывалась так, чтобы поверхность, ограничивающая активную зону реактора, оказалась бы по возможности ближе к сферической. Радиус этой сферической поверхности составлял около трёх метров. Отражательная оболочка реактора представляла собой слой графита толщиной 80 *см*. Для установки реактора было построено специальное здание, разрез которого дан на рис. 57.

Ядерный реактор собирался постепенно по слоям. После укладки каждого слоя измерялось количество нейтронов, рождающихся в реакторе. Особенно тщательно измерения количества нейтронов производились по мере приближения реактора к критическим размерам. На рис. XLI и XLII

в конце книги представлены различные стадии сборки первого советского реактора: кладка нижней части отражателя реактора (рис. XLI) и кладка активной зоны реактора (рис. XLII). Регулировка реактора и его пуск осуществлялись при помощи кадмиевых стержней.

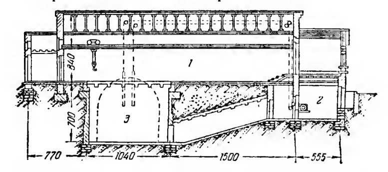


Рис. 57. Разрез здания, в котором был установлен первый советский реактор.

1 — главный зал, 2 — лаборатория, 3 — реактор; размеры указаны в сантиметрах.

В первом реакторе не был предусмотрен непрерывный отвод выделяющейся при делении энергии, поэтому длительная работа реактора была возможна лишь на небольшой мощности, порядка 10 ватт. Однако кратковременно, за счет большой теплоёмкости системы, можно было повышать мощность реактора до нескольких киловатт.

Произведённые опыты показали, что реактор данной конструкции обладает свойством саморегулировки и является абсолютно взрывобезопасным. При извлечении кадмиевого стержня мощность реактора сначала возрастает почти до 4000 киловатт, а затем, по истечении нескольких минут, падает. Это уменьшение мощности происходит вследствие уменьшения коэффициента размножения при нагревании реактора.

Атомная бомба

В атомной бомбе, так же как и в атомном реакторе, используется энергия, освобождаемая при делении ядер урана или плутония. В обоих случаях освобождение энер-

гии происходит путём осуществления цепной реакции. Но в то время, как в реакторе стараются замедлить развитие цепной реакции, в атомной бомбе процесс выделения энергии совершается чрезвычайно быстро. В атомных реакторах цепная реакция развивается и поддерживается главным образом медленными нейтронами. В атомной бомбе осуществлять цепную реакцию при помощи медленных нейтронов нельзя, ибо процесс замедления нейтрона требует некоторого времени, вследствие чего развитие цепной реакции замедляется. Поэтому в атомных бомбах цепная реакция осуществляется быстрыми нейтронами. Следовательно, в них не должно быть замедлителя.

Но известно, что с природным ураном цепная реакция на быстрых нейтронах не развивается. Слишком мало в нём атомов урана 235. Если бы уран состоял только из изотопа 235 или его содержание в смеси было бы в значительной степени увеличено, то цепная реакция могла бы пойти и без замедлителя, развиваясь достаточно быстро.

Что касается отражателя нейтронов, то его толщину приходится делать незначительной, чтобы не увеличивать чрезмерно размеры и вес атомных бомб. Отсутствие замедлителя и малая толщина отражателя уменьшают значения коэффициентов p и k, поэтому поддержание цепной реакции (условие $npk \geqslant 1$) требует большого значения величины n, т. е. более высокого содержания урана 235. Вот почему возникла задача организации разделения изотопов урана в большом масштабе.

Помимо отделения изотопов урана, наметился и другой путь осуществления цепной реакции на быстрых нейтронах — использование плутония 239. По своим свойствам (в отношении деления) плутоний 239 близок к урану 235. Плутоний непрерывно образуется в процессе работы уранового реактора. Для получения больших количеств плутония нужно строить урановые реакторы большой мощности. Так, например, для получения одного килограмма плутония в сутки необходимы реакторы мощностью до 1 500 000 киловатт.

Создание реакторов большой мощности явилось не единственной задачей, которую пришлось разрешить с целью получения практически достаточных количеств плутония. Нужно было также разработать химию плутония, этого

неизвестного ранее элемента. Без знания химии плутония невозможно было бы извлекать плутоний из урановых блоков реактора.

Чтобы отчётливо представить себе трудность всей этой задачи, надо учесть, что необходимо было организовать отделение плутония, содержащегося в малых количествах в смеси с огромным количеством урана, близкого к нему по химическим свойствам. Химия плутония была разработана с полнотой, достаточной для решения поставленной задачи, при помощи препаратов плутония, полученных в циклотронах. Достойно удивления, что разработку химии плутония удалось совершить, пользуясь всего лишь 0,5 миллиграмма плутония.

Итак, в качестве материала для атомной бомбы могут служить или уран 235, или плутоний 239. Естественно, что атомный взрыв произойдёт только в том случае, если цепная реакция будет развиваться быстро. Для этого необходимо иметь плутоний или уран 235 в виде сплошного куска, масса которого превышает критическую (напомним, что критической массой называют такое количество делящегося материала, для которого выполняется условие $npk=1$).

Атомная бомба состоит из двух или нескольких кусков урана (или плутония), размеры которых меньше критических, и устройства, предназначенного для соединения этих кусков в одну сплошную массу. В каждом отдельном куске цепная реакция не развивается. Эти куски совершенно безопасны. Однако, соединив их, мы получим массу, бо́льшую критической, и цепная реакция начнёт бурно развиваться, приводя к мощному взрыву.

Соединение отдельных кусков урана надо производить чрезвычайно быстро. При медленном сближении они вследствие теплового перегрева могут развалиться на части: бомба разрушится, не взорвавшись. При быстром сближении кусков урана или плутония цепная реакция успеет развиться до того, как взрыв уничтожит оболочку бомбы. Собственно говоря, атомная бомба и представляет собой устройство для быстрого соединения частей урана (или плутония).

На рис. 58 схематически показаны некоторые из возможных способов быстрого соединения докритических масс ядерного взрывчатого вещества. На рис. 58, *А* две докри-

тические массы, расположенные в достаточном отдалении друг от друга, соединяются под действием пускового механизма. Таким быстродействующим пусковым механизмом является взрыв небольшого количества обычного взрывчатого вещества. Образно выражаясь, можно сказать, что для получения атомного взрыва надо выстрелить одним куском урана в другой.

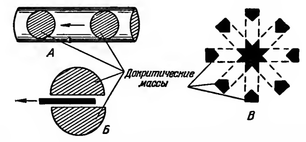


Рис. 58. Различные способы быстрого соединения докритических масс для получения массы критических размеров.

Рис. 58, *Б* показывает, что две докритические массы, разделённые барьером, могут соединиться при удалении барьера. Рис. 58, *В* показывает расположение группы докритических масс вокруг одного докритического центрального куска. Под действием пускового механизма расположенные на периферии массы устремляются к центру. В результате и происходит атомный взрыв.

Действие атомного взрыва зависит от того, в каких условиях он произведён. Взрыв может быть произведён высоко над землёй, у поверхности земли, под водой и т. д. Первая стадия взрыва в воздухе характеризуется образованием огненного шара (см. рис. XLIII в конце книги). Продукты реакции находятся под очень большим давлением. Температура в зоне реакции превышает миллион градусов. Воздух вокруг бомбы раскаляется до свечения. Световая вспышка видна на расстоянии свыше 100 *км*.

Огненный шар быстро растёт, доходя до 500 *м* в диаметре. По мере расширения он поднимается подобно воздушному шару вверх со скоростью в несколько десятков метров в секунду. На высоте 12—15 *км*, где плотность окружающего воздуха примерно равна плотности шара, он принимает

форму гриба и образует плоское облако раднусом в несколько кнлометров, сохраняющееся до тех пор, пока его не развеет ветер.

Одновременно с образованнем огненного шара в центре взрыва возникает ударная волна. Эта волна распространяется от центра через огненный шар со скоростью, превышающей скорость звука.

Атомная бомба является нсточннком разнообразных нзлученнй. В момент взрыва нспускаются в большом колнчестве нейтроны н гамма-лучи, а также вндимое, ннфракрасное н ультрафиолетовое нзлучения. Нейтроны и гамма-лучн образуются в процессе деления; световое излучение — в результате нагрева. После завершення взрыва в поражённой зоне обнаружнваются гамма- и бета-лучн, возннкающне при бета-распаде осколков, а также альфа-частнцы от неразделнвшнхся ядер урана.

При подводном взрыве вместо огненного шара наблюдается огромный газовый пузырь, образующнйся от быстрого нспарення воды н лопающийся на поверхностн воды одновременно с возникновеннем ударной волны. Прн этом огромная масса воды поднимается вверх, образуя водяной купол (см. рнс. XLIV в конце книги). На поверхностн воды появляется волна, высота которой может достигать 30 *м*. Эта волна представляет большую опасность для судов н береговых сооруженнй.

Лопаясь у поверхностн воды, газовый пузырь на мгновенне образует огромную воронку. Устремляющнйся в неё поток создаёт столб вспенённой воды, называемый «султаном» (рнс. XLV в конце кннгн). Водяной султан нмеет форму полого цнлнндра с макснмальным диаметром порядка 600 *м*, прн толщнне стенкн около 90 *м*. Прн этом в воздух уноснтся до 1 мнллнона тонн воды.

Султан подннмается на высоту 1800—2400 *м*, где встречается с более холоднымн слоямн воздуха, прнчём его верхняя часть нмеет внд облака, похожего по форме на цветную капусту. Прн замедлении подъёма нижняя часть султана начннает падать обратно в море, н у подножня султана возннкает гнгантская волна высотой 250—300 *м*, состоящая из пены и мелкнх капель воды. Эту волну прнннято называть базисной. Базнсная волна распространяется во все стороны от места взрыва. По мере распространення базнсная волна

постепенно поднимается над поверхностью моря и сливается с низкими кучевыми облаками над местом взрыва. При наличии ветра такие облака распространяются на большие расстояния. Начинается дождь, вода в котором оказывается радиоактивной.

При взрыве у поверхности земли образуется воронка; большое количество земли оказывается выброшенным в атмосферу. Атомы радиоактивных изотопов слипаются с частицами пыли и оседают на землю в виде твёрдых осадков. Вследствие этого в районе взрыва возникает значительная местная концентрация радиоактивных веществ. Ударная волна и тепловое воздействие при взрыве у поверхности земли также весьма интенсивны, однако они распространяются на меньшую площадь, чем при воздушном взрыве.

Взрыв атомной бомбы может причинить большие разрушения. Ударная волна создает значительные давления даже на сравнительно больших расстояниях от места взрыва. Под действием этой волны прочные городские здания могут быть сильно разрушены в пределах примерно километра во все стороны от места взрыва.

Тепловое излучение также представляет значительную опасность. Около $^1/_3$ всей энергии, выделяющейся при взрыве атомной бомбы, переходит в излучение, что составляет приблизительно $5 \cdot 10^{12}$ калорий. Тепловые лучи распространяются со скоростью света (300 000 километров в секунду) и вызывают воспламенение горючих материалов.

Весьма опасны также и радиоактивные излучения, возникающие в зоне взрыва. Надо отметить при этом, что действие гамма-лучей и нейтронов представляет существенную опасность примерно в той же области, где сказывается действие ударной волны и тепловых лучей. Дополнительную опасность несут бета-радиоактивные вещества, которые остаются после взрыва атомной бомбы. Зона их действия зависит от характера взрыва и направления ветра.

В настоящее время разработаны и проверены многочисленные меры противоатомной защиты. К числу наиболее надежных защитных средств относятся различные подземные сооружения и специальные убежища, позволяющие надежно укрывать людей от всех последствий атомного взрыва.

ГЛАВА XIII

О МИРНОМ ПРИМЕНЕНИИ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Атомные электростанции

Первая электростанция, работающая на ядерном горючем, была построена в Советском Союзе и введена в эксплуатацию 27 июня 1954 г. Её полезная мощность 5000 киловатт.

Конструкция атомной электростанции основана на следующих принципах. При работе атомного реактора в результате деления ядер урана освобождается большая энергия. Освобождаемая энергия уносится осколками, нейтронами, электронами и гамма-квантами и при торможении этих частиц превращается в тепло, нагревая центральную часть реактора. Это тепло можно использовать для испарения воды или другой подходящей жидкости и создания пара достаточно высокого давления. Полученный пар приводит в движение турбину и связанный с нею генератор электрического тока. Турбина и генератор могут быть точно такими же, как на обычных тепловых электростанциях.

Создание атомной электростанции потребовало решения ряда новых задач.

Естественно, что электростанция должна работать непрерывно достаточно длительное время. За длительный промежуток времени первоначально взятое количество ядерного горючего постепенно «выгорает» в результате деления. С другой стороны, в реакторе накапливаются в большом количестве продукты деления — осколки (радиоактивный шлак), поглощающие тепловые нейтроны. Среди них особенно вредную роль играет ксенон 135, «жадно» захватывающий тепловые нейтроны. В результате деления ядер урана 235 концентрация его в горючей смеси уменьшается, в то же время растёт концентрация ксенона 135. Оба эти фактора приводят к уменьшению величины коэффициента k

и произведение *npk* по мере работы реактора становится всё меньше. Для того чтобы, несмотря на появление в реакторе шлака и уменьшение количества урана 235, произведение *npk* оставалось равным единице, необходимо заранее предусмотреть наличие избыточного запаса горючего в реакторе и способ регулировки выделяемой мощности. Для этого в активную зону реактора надо ввести вещества, сильно поглощающие тепловые нейтроны. В реакторе атомной электростанции для этой цели используются стержни из карбида бора. Всего таких стержней 18, из них 6 располагается вблизи центра активной зоны, а 12 на её периферии. По мере накопления шлака и уменьшения количества урана 235 в горючей смеси эти стержни выдвигают из котла. При этом уменьшается потеря тепловых нейтронов, т. е. увеличивается коэффициент *k* и поддерживаются условия, необходимые для протекания цепной реакции ($npk \geqslant 1$).

Так как уже с самого начала в реактор приходится вводить большое количество вещества, поглощающего нейтроны, работа реактора на природном уране оказывается невозможной. Пришлось поэтому выбрать в качестве горючего урановую смесь, обогащённую изотопом урана 235.

В реактор первой атомной электростанции загружался уран, содержащий 5% изотопа урана 235 (вместо 0,7% в природном уране). Такая концентрация урана 235 позволяет осуществить запуск реактора с полностью погруженными в него 18 стержнями из карбида бора. Обогащение урана позволяет также несколько сократить размеры реактора и уменьшить радиус активной зоны. В реакторе атомной электростанции активная зона (горючее и замедлитель) имеет форму цилиндра высотой 150 *см* и диаметром 170 *см*. На рис. 59, изображающем разрез реактора электростанции, активная зона выделена пунктиром. Замедлителем, как и у первого советского реактора, служил графит, в котором в виде правильной пространственной решётки были размещены урановые стержни. Для размещения стержней в графите было сделано 128 специальных каналов.

В реакторе атомной электростанции должно возникать тепло, за счёт которого создаётся пар, приводящий в движение турбину. Тепло в реакторе выделяется в основном в урановых блоках. При нормальных условиях тепловой поток, выделяющийся с поверхности урана, составляет

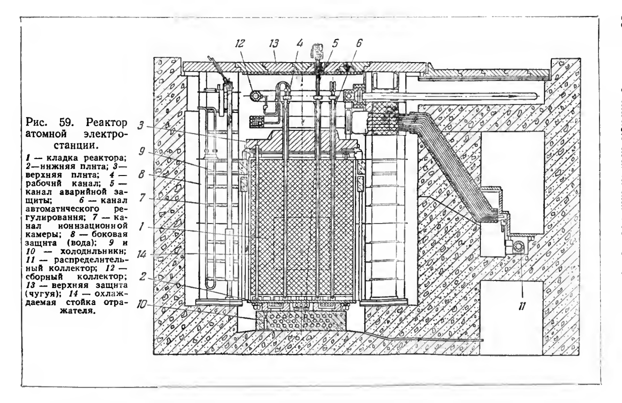


Рис. 59. Реактор атомной электростанции.

1 — кладка реактора; *2* — нижняя плита; *3* — верхняя плита; *4* — рабочий канал; *5* — канал аварийной защиты; *6* — канал автоматического регулирования; *7* — канал ионизационной камеры; *8* — боковая защита (вода); *9* и *10* — холодильники; *11* — распределительный коллектор; *12* — сборный коллектор; *13* — верхняя защита (чугун); *14* — охлаждаемая стойка отражателя.

полтора миллиона больших калорий в час с одного квадратного метра. Для удаления этого тепла необходимо интенсивно охлаждать урановые блоки. В реакторе атомной электростанции охлаждение осуществляется обыкновенной водой, находящейся под большим давлением. Вода сильно разрушает уран, поэтому приходится помещать каждый урановый стержень внутрь тонкостенной трубки из нержавеющей стали и всё это заключать в другую такую же трубу с тем, чтобы охлаждающая вода двигалась в пространстве между двумя концентрическими стальными трубами.

После загрузки свежим горючим реактор может непрерывно работать в течение двух с половиной месяцев. По истечении этого срока урановые стержни необходимо заменять новыми (к этому времени содержание урана 235 в стержнях равно 4,2%).

Как и в первом советском реакторе, в качестве вещества, отражающего нейтроны, был использован графит. Активная зона размещалась внутри графитовой кладки, толщина стен которой достигала 80 *см*. Вся кладка заключалась в герметический стальной кожух, заполненный гелием и покоящийся на бетонном основании. В отражателе размещались также стержни из карбида бора, предназначенные для сохранения мощности реактора на заданном уровне. При нарастании мощности стержни автоматически вводятся глубже внутрь реактора, а при понижении мощности несколько выводятся из реактора. Кроме стержней автоматического регулирования и стержней, компенсирующих выгорание урана и образование шлаков, в реакторе предусмотрены ещё два аварийных стержня, предназначенных для быстрой остановки реактора. При поступлении аварийного сигнала эти стержни падают в активную зону реактора. Поглощение нейтронов при этом резко возрастает, коэффициент размножения нейтронов становится меньше единицы и цепная реакция прекращается.

В реакторе атомной электростанции имеются специальные каналы, предназначенные для облучения нейтронами различных веществ. Плотность потока нейтронов в этих каналах достигает $8 \cdot 10^{13}$ *нейтронов/см²·сек*.

Биологическая защита реактора обеспечивается слоем воды толщиной 1 *м* и бетонной стеной толщиной 3 *м*. В верхней части реактора биологическая защита обеспечена увели-

чением толщины графитового отражателя, а также стальной крышкой и чугунной плитой.

Как мы уже отмечали, перенос тепла от реактора осуществляется непрерывно циркулирующей водой. Вода, охлаждающая реактор, циркулирует в герметически замкнутом контуре и проходит через специальный теплообменник. В теплообменнике тепло от воды, циркулирующей в первом контуре, передаётся воде, циркулирующей во втором контуре, превращая её в пар, который приводит в

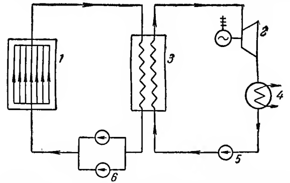


Рис. 60. Принципиальная схема атомной электростанции.
1 — реактор, 2 — турбогенератор, 3 — теплообменник, 4 — конденсатор, 5 и 6 — насосы.

движение турбину и электрический генератор. Принципиальная схема атомной электростанции показана на рис. 60.

Контроль за всеми сторонами работы атомной электростанции осуществляется автоматически при помощи быстродействующих приборов и схем с центрального пульта управления.

Опыт эксплуатации первой атомной электростанции дал много сведений для оценки экономических показателей таких станций. Стоимость одного киловатт-часа электрической энергии, вырабатываемой на первой атомной электростанции, оказался выше средней стоимости киловатт-часа на обычных тепловых электростанциях. Однако уже сейчас имеется немало путей для снижения стоимости атомной электроэнергии.

В настоящее время разработан проект станции на 100 000 киловатт. Экономические показатели этой станции оказываются близкими к показателям тепловых электростанций аналогичных мощностей. Хотя стоимость ядерного горючего (рассчитанная на один киловатт-час) и несколько выше стоимости топлива угольной станции, однако ряд благоприятных показателей — меньшие расходы энергии на собственные нужды станции, отсутствие больших топливных складов, системы подачи топлива, углеразмольных мельниц и других громоздких сооружений, обязательных для угольных станций, делает атомные электростанции вполне рентабельным источником энергии. Атомная электростанция может быть более экономична, чем угольная электростанция, находящаяся далеко от района добычи угля или работающая на низкосортном топливе. Дальнейшее развитие и совершенствование атомных электростанций сделает их ещё более экономичными.

Чтобы яснее представить себе возможности развития ядерных энергетических систем для мирных целей, надо учесть ещё, что ядерный реактор вырабатывает не только тепло, но также одновременно и новое ядерное горючее. Основная масса естественного урана состоит из изотопа урана 238, не делящегося под действием медленных нейтронов. Проникновение медленного нейтрона в ядро урана 238, как уже указывалось, приводит не к делению этого ядра, а к образованию (путём двух бета-превращений) изотопа плутония 239. Плутоний 239 также является ядерным горючим, делящимся под действием медленных нейтронов. Поэтому ядерный реактор не только расходует ядерное горючее (уран 235), но и создаёт его (плутоний 239).

В реакторе первой советской электростанции коэффициент воспроизводства плутония сравнительно мал — 0,32 (на 100 израсходованных атомов урана 235 возникает 32 атома плутония 239). Однако его можно увеличить. В реакторах, использующих быстрые нейтроны, коэффициент воспроизводства плутония имеет значительно бо́льшую величину. Теоретическое его значение равно 1,5. Если коэффициент воспроизводства плутония будет равен единице, то реактор в процессе работы будет расходовать и производить одинаковое количество горючего. Если же

этот коэффициент будет больше единицы, то количество производимого горючего превысит его расход и реактор окажется источником дополнительного ядерного топлива.

Другой особенностью ядерного реактора является то, что в нём производится не только энергия и ядерное горючее, но также и радиоактивные изотопы. Эти изотопы периодически извлекаются из реактора и могут быть использованы в народном хозяйстве. Следовательно, атомные энергосистемы необходимо развивать комплексно.

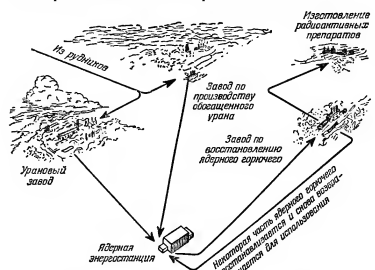


Рис. 61. Схема комплексной атомной энергосистемы.

На рис. 61 показано, какие заводы и предприятия необходимо иметь для комплексной работы атомной электростанции. Комплексное использование ядерных реакторов и усовершенствование их конструкции, несомненно, улучшит их экономические показатели.

В Советском Союзе намечается широкое строительство атомных электростанций. В течение 1956—1960 гг. будут построены атомные электростанции общей мощностью 2—2,5 миллиона киловатт. Сооружение атомных электро-

станций будут производить в первую очередь в районах, не имеющих собственной топливной базы. Атомные электростанции строятся также в Англии, США, Канаде и Франции.

Атомные силовые установки

Огромным преимуществом ядерных реакторов является то, что в них выделение энергии сопровождается ничтожно малым расходом горючего. Так, например, при делении 1 *г* урана 235 выделяется энергия, равная $8{,}2\cdot10^{10}$ джоулей. Если даже учесть, что при превращении тепловой энергии в работу полезно используется только 25% этой энергии, то и тогда деление одного грамма урана обеспечит работу двигателя мощностью в 100 000 киловатт в течение 3,5 минуты. Для непрерывной работы такого двигателя в течение целого месяца потребуется всего лишь около 12 *кг* урана 235.

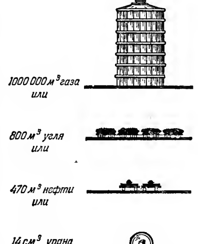


Рис. 62. Сравнительные объёмы атомного и других видов горючего, производящих одно и то же количество тепла.

Рис. 62 наглядно иллюстрирует количества различных видов топлива, имеющие одинаковый запас энергии. Количество атомного топлива столь невелико, что даже если его рассматривать через сильно увеличивающую лупу, то и тогда оно будет иметь вид небольшого зёрнышка.

Другим существенным достоинством ядерного топлива является то, что для его «сжигания» не нужно никаких дополнительных веществ, в частности, кислорода. А для полного сгорания одной тонны углерода нужно 2,66 *т* кислорода. Применение атомной энергии позволит построить мощные двигатели, способные длительное время работать без

пополнения запасов горючего и других подсобных материалов.

Однако надо иметь в виду, что применение атомных двигателей связано с преодолением немалых трудностей. Ядерный реактор, являющийся центральной частью силовой установки, имеет обычно весьма большие размеры и вес. Атомному двигателю присуща одна особенность. Его не запустишь, пока не заполнишь горючим «до края», а «ёмкость» его резервуара велика. Правда, критические размеры ядерного реактора могут быть уменьшены, если применить в качестве горючего сильно обогащённый уран, а в качестве замедлителя воду (обыкновенную или тяжёлую) вместо графита. В воде замедление нейтронов происходит на более коротком пути, чем в графите, поэтому критические размеры реактора значительно уменьшаются. Уменьшение общего объёма реактора может быть также достигнуто за счёт уменьшения толщины отражающего слоя при замене графита веществами, содержащими водород. Все эти мероприятия могут значительно уменьшить объём и вес реактора. В реакторе, в котором обогащённое ядерное горючее растворено в воде, активная зона может быть очень невелика, порядка 30 *см* в диаметре, а толщина защитной оболочки не будет превосходить двух метров. Цепная реакция начнётся при загрузке горючего в количестве, приблизительно равном 1 *кг*.

Уменьшение веса и объёма ядерных реакторов делает их пригодными для питания энергией двигателей, однако ясно, что устройство «портативных» двигателей, пригодных, например, для установки на автомобиле, пока практически неосуществимо.

Ядерные реакторы можно использовать для устройства очень мощных двигателей, предназначенных для работы в течение весьма длительного времени.

В США построена подводная лодка с атомным двигателем, названная «Наутилус». Она имеет водоизмещение 2700 *т*. Ядерным горючим является уран, обогащённый изотопом 235. Тепло, образующееся при делении урана, отводится обыкновенной водой, которая одновременно служит и замедлителем нейтронов. Вода циркулирует между реактором и котлом-теплообменником, где передаёт тепло воде вторичного контура. Мощность турбины 8000 лоша-

диных сил. Турбина приводит в действие электрический генератор, который питает моторы, вращающие гребные винты «Наутилуса».

Расчётная скорость «Наутилуса» 37 *км* в час под водой и 65 *км* в час над водой. Предполагается, что он может совершить кругосветное путешествие без заправки горючим.

Недавно вступила в строй вторая американская подводная лодка «Морской волк».

В Советском Союзе главное внимание учёных устремлено на решение вопросов, связанных с мирным применением атомной энергии. В директивах XX съезда КПСС по шестому пятилетнему плану намечено проведение работ по использованию атомной энергии на кораблях, железнодорожном транспорте и в авиации. В частности, поставлена задача — построить ледокол с атомным двигателем.

Ледокол, снабжённый атомным двигателем, мог бы совершать длительные рейсы во льдах Арктики без захода в какой-либо порт. Водоизмещение проектирующегося в Советском Союзе первого атомного ледокола 16 000 *т*. Мощность его главных двигателей 44 000 лошадиных сил. Запасы, принимаемые на борт корабля, позволят ему не заходить в порты в течение года. Корпус атомного ледокола будет значительно прочнее и тяжелее, чем у обычных ледоколов, что позволит ему двигаться в более прочных ледяных полях.

Меченые атомы и их применение в народном хозяйстве

Открытие искусственной радиоактивности передало в руки учёных замечательное орудие для исследования: «меченые атомы». Что же такое меченые атомы и каковы их применения?

Мы уже знаем, что радиоактивные вещества неустойчивы. Со временем они «исчезают», распадаются. Распад каждого радиоактивного вещества сопровождается излучением альфа-, бета- или гамма-лучей. Радиоактивное излучение может быть легко зарегистрировано (например, при помощи счётчика Гейгера-Мюллера), что позволяет обнаруживать присутствие атомов радиоактивного изотопа среди других веществ, в частности и среди атомов нерадиоактивных изотопов данного элемента. По характеру радио-

активного излучения (природа частиц, величина их энергии, период полураспада) можно всегда установить, какие радиоактивные изотопы присутствуют в данном веществе. Умея находить радиоактивные атомы, мы можем проследить за поведением интересующего нас вещества.

Допустим для примера, что в смеси различных веществ присутствует фосфор. Подмешаем к этой смеси небольшое количество радиоактивного фосфора, достаточное для того, чтобы можно было регистрировать его излучение. Если мы подвергнем нашу смесь какому-нибудь химическому воздействию, то произойдут химические реакции, в результате которых некоторые вещества могут перейти в раствор, часть веществ может оказаться в твёрдом состоянии, другая часть — в газообразном. Что же произойдёт при этом с фосфором? В каком состоянии окажется он после реакции?

На эти вопросы можно ответить, установив, где обнаруживается радиоактивное излучение — в жидкости, газе или твёрдом веществе. Там, где мы найдём радиоактивность, будет находиться и фосфор. Поскольку химические свойства радиоактивных и нерадиоактивных изотопов совершенно одинаковы, одинакова будет и судьба радиоактивного и нерадиоактивного фосфора. Поэтому, где окажется радиоактивный фосфор, там должен быть и фосфор нерадиоактивный. Таким образом, наблюдая за поведением радиоактивного изотопа, мы можем судить и о поведении интересующего нас элемента.

Радиоактивность является той самой меткой, которая позволяет следить за поведением атомов. Отсюда и название этого метода — метод меченых атомов.

Создание ядерных реакторов позволило получать большие количества различных радиоактивных изотопов. Радиоактивные изотопы получались и раньше, до построения ядерных реакторов и даже до открытия деления ядер. Их, например, можно получать в циклотронах, облучая различные вещества пучком быстрых дейтронов или альфа-частиц. Однако количество получаемых таким способом радиоактивных изотопов невелико, а стоимость их весьма значительна.

Положение в корне изменилось, когда были построены ядерные реакторы. В ядерных реакторах возникает громадное количество нейтронов. Часть из них идёт на поддержа-

ние цепной реакции, другая часть может быть использована для получения радиоактивных изотопов.

Проникая в ядра атомов, нейтроны меняют состав ядра, создавая неустойчивые радиоактивные ядра. Возникновение радиоактивных изотопов в ядерном реакторе происходит не только при облучении нейтронами. Радиоактивные изотопы возникают также и в ходе деления ядер урана. Осколки, образующиеся при делении, радиоактивны. Их приходится удалять из реактора, так как они мешают его нормальной работе. Однако удаление осколков обычно требует остановки ядерного реактора, что можно делать довольно редко. Поэтому основным источником радиоактивных изотопов является облучение нейтронами различных стабильных элементов, вносимых в реактор.

Конечно, не все радиоактивные изотопы могут быть использованы на практике. В таблице VI (стр. 225) приведён список наиболее важных радиоактивных изотопов. В этом списке мы находим представителей многих химических элементов. Отсутствующие в этом списке элементы также, конечно, имеют радиоактивные изотопы. Но периоды полураспада у большинства этих изотопов невелики и потому такие изотопы не получили широкого применения.

Регистрация меченых атомов производится довольно просто. Наиболее часто для этой цели используют счётчики Гейгера-Мюллера и фотографические методы регистрации радиоактивных атомов. К последним обычно прибегают тогда, когда необходимо выяснить распределение меченых атомов в каком-либо участке исследуемого тела. Для этого к данному участку прикладывают фотопластинку и спустя некоторое время проявляют её. Радиоактивные излучения засвечивают пластинку. Поэтому после проявления на ней окажутся тёмные пятна. Распределение почернения пластинки покажет нам распределение радиоактивного вещества в исследуемом теле. Такие снимки, полученные благодаря действию радиоактивного излучения, получили название «радиоавтографов».

Примеры радиоавтографов приведены на рис. XLVI и XLVII в конце книги. На рис. XLVI показан радиоавтограф листа помидора, подкормленного радиоактивным фосфором. Этот отпечаток получен при наложении листа на фотопластинку, завёрнутую в чёрную бумагу. Рис. XLVII

представляет радиоавтографы, полученные со срезов плода помидора, подкормленного радиоактивным цинком. На обоих снимках отчётливо видно, где сконцентрировались радиоактивные вещества, какие части растения лучше всего усваивают те соли, в состав которых входило радиоактивное вещество.

Меченые атомы широко применяются в науке и технике. В рамках настоящей книги мы не можем подробно описать и даже перечислить все эти применения и ограничимся лишь некоторыми примерами.

Метод меченых атомов имеет большое значение для изучения процессов, совершающихся в живых организмах. Обычно в организм, в процессе нормального его функционирования, вводятся те же химические элементы, которые уже в значительном количестве в нём содержатся (кислород, водород, азот, железо, натрий и т. д.). Естественно, что химический анализ, который и без того трудно применять к живому организму, не позволяет отличить атомы, вводимые в организм, от тех, которые были там раньше. Другое дело — меченые атомы. Они могут быть легко обнаружены и в том случае, если родственные им химические вещества уже находились в организме.

Следует при этом иметь в виду, что счётчик Гейгера-Мюллера обладает высокой чувствительностью; он способен регистрировать каждый отдельный радиоактивный акт — распад одного атома. Поэтому при исследовании можно ограничиться столь малыми примесями радиоактивного вещества, что их присутствие будет совершенно безопасно для организма.

Методика наблюдения бывает зачастую совершенно проста. Например, при изучении быстроты всасывания желудком различных солей счётчик Гейгера-Мюллера просто зажимают в руке экспериментатора, принявшего исследуемую соль вместе с примесью соответствующего радиоактивного вещества. Всасывающиеся в желудок соли разносятся током крови по всему организму и попадают в руку. Время появления импульсов в счётчике Гейгера-Мюллера характеризует быстроту всасывания исследуемых солей.

Меченые атомы оказывают неоценимую помощь в поисках новых лекарственных веществ. Возьмём, например,

такую болезнь, как гипертония. Она связана с повышением кровяного давления. Для лечения этой болезни необходимы вещества, способствующие расширению кровеносных сосудов. По расширенным сосудам кровь движется под меньшим давлением. Для определения сосудорасширяющего действия различных веществ человеку одновременно с введением исследуемого вещества вводят радиоактивный натрий (в ручную вену) или радиоактивный ксенон (через дыхательные пути) и наблюдают при помощи счётчиков Гейгера-Мюллера появление активности в различных частях тела. У здорового человека кровь от кисти руки до ступней ног движется примерно 40 сек. Приём лекарств, расширяющих кровеносные сосуды, уменьшает это время до 20—30 сек.

Применение меченых атомов позволило установить, в какие части организма быстрее всего проникают различные вещества, найти скорость их обмена, установить, в каких частях тела накапливаются те или другие вещества. Так было выяснено, что вводимый в организм иод концентрируется преимущественно в щитовидной железе, что и позволило применить радиоактивный иод для борьбы с некоторыми видами заболеваний щитовидной железы.

Меченые атомы оказывают неоценимую помощь хирургу. При оперировании опухолей мозга особенно важным является точное определение места, где залегает опухоль. Для этой цели используется радиоактивный иод. Соединение иода — дииодофлуоресцин — избирательно поглощается тканями опухоли. Это соединение, меченное радиоактивным иодом, вводится в организм путём инъекции. Концентрируясь в опухоли, оно излучает гамма-лучи, регистрация которых позволяет точно определить местонахождение опухоли.

Метод меченых атомов широко используется при исследовании сложнейших биохимических процессов, лежащих в основе деятельности нервной системы. Изучение биохимических процессов, протекающих в коре головного мозга во время сна, показало, что процессы синтеза преобладают над процессами распада; это и приводит к восстановлению работоспособности мозга во время сна.

Огромное значение имеют меченые атомы в агротехнике. С их помощью можно найти эффективные методы повышеиия

урожайности, так как, изучив характер усвоения растением тех или иных питательных веществ, можно выработать наилучшие способы питания растений. Так, при помощи радиоактивного фосфора был решён вопрос о том, как наилучшим образом размещать в почве удобрения, чтобы обеспечить достаточным фосфорным питанием корни молодого растения. Опыты показали, что наиболее целесообразно вносить фосфаты (по крайней мере гранулированный суперфосфат) при посеве прямо в рядки. Такая закладка даже при небольших дозах удобрения обеспечивает наилучшее питание ростков.

Меченые атомы позволяют установить наилучшие сроки подкормки растений. Например, было выяснено, что кукуруза усваивает фосфатные удобрения в ранний период вегетации. На более поздних стадиях её глубоко проросшие корни извлекают бо́льшую часть необходимого ей фосфора непосредственно из неудобренной почвы. В противоположность кукурузе картофель извлекает необходимый ему фосфор из удобрений непрерывно. Опыты, произведённые с табаком, показали, что фосфатные удобрения под посевы табака оказываются малоэффективными.

Радиоактивный углерод помог учёным обнаружить, что корневая система является не только передатчиком растению тех веществ, которые она извлекает из почвы. Роль корневой системы шире. Она сама преобразует часть минеральных веществ в органические. Вопреки принятому мнению оказалось, что корни растений извлекают из почвы также углекислоту и её соли и передают её в листья, где она и усваивается. Таким образом, были открыты новый дополнительный источник углеродного питания растений и новая функция корней, которая раньше считалась принадлежащей только зелёным частям растения.

Выяснилось также, что листья могут принимать на себя обычную функцию корней, осуществляя минеральное питание растений. Это используется теперь при так называемой внекорневой подкормке растений. Применение нового способа подкормки повышает урожаи хлопка на 10—15%. В настоящее время внекорневые подкормки хлопчатника проводятся в нашей стране на больших площадях.

Значительно быстрее, чем считалось раньше, совершается и движение веществ по растению. Чтобы проверить, как дви-

жется в растении сахар, в клетки зелёного листа вводили радиоактивный сахар (содержащий радиоактивный изотоп углерод 14). Оказалось, что сахар продвигается по растению со скоростью 70—80 *см/час*. Скорость перемещения воды ещё больше. Она доходит до 14 *м/час*. Вещества, направляющиеся из корней к листьям, перемещаются по растению со скоростью 2—4 *м/час*. Пластические вещества из листьев перемещаются к корням или в плоды со скоростью 1—1,5 *м/час*.

Растения являются своеобразными микроскопическими фабриками, работающими на трёх основных видах «сырья» — воде, углекислоте и солнечном свете. Солнце поставляет энергию, при помощи которой вода и углекислота синтезируются, образуя углеводы. Тайна роста зелёного растения занимала многие поколения учёных. Меченые атомы дают теперь в руки учёных новый метод, позволяющий проникнуть и в этот секрет природы. При помощи меченых атомов удалось показать возможность усвоения углекислоты и восстановления её вне клетки и установить важную роль в этом процессе соединений, содержащих железо. Было показано, что в растениях в процессе фотосинтеза образуются не только углеводы, как это считалось раньше, но и белки. Удалось подтвердить непосредственное участие воды в образовании выделяющегося при фотосинтезе кислорода и выделить промежуточные продукты фотосинтеза.

Меченые атомы помогают археологам определять возраст предметов, обнаруженных при раскопках. Для этого используется радиоактивный углерод 14 с периодом полураспада 5700 лет.

Установлено, что под влиянием нейтронов, возникающих в результате взаимодействия космического излучения с земной атмосферой, в воздухе происходит частичное превращение азота 14 в радиоактивный углерод 14:

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H.$$

Так как интенсивность космических лучей остаётся неизменной во времени, то неизменной оказывается и концентрация $^{14}_{6}C$. Радиоактивный углерод 14 имеется повсюду, где находится обыкновенный углерод. Он участвует во всех процессах, которые совершаются с углеродом в при-

роде. В каждом живом организме происходит углеродный обмен. Усваивая из воздуха углерод, растения получают и атомы углерода 14. Поэтому клетчатка живых растений должна содержать радиоактивный углерод. Концентрация углерода 14 относительно невелика. На один грамм углерода клетчатки, взятого из любого растения, приходится около 50 миллиардов атомов углерода 14. Это позволяет надёжно установить не только присутствие углерода 14 в растении, но и определить его количество.

Пока растение живёт, концентрация радиоактивного углерода в нём остаётся неизменной. Распадающийся углерод непрерывно заменяется новым. Со смертью растения прекращаются и углеродный обмен, растение перестаёт получать новый радиоактивный углерод. Количество радиоактивного углерода в нём начинает уменьшаться. Через 5700 лет оно уменьшится в два раза. Через 11 400 лет концентрация радиоактивного углерода составит $^{1}/_{4}$ от нормального значения, а через 22 800 лет — всего 6%. Достаточно археологу при раскопках древнего поселения найти какой-либо сохранившийся деревянный предмет и определить количество находящегося в нём радиоактивного углерода, чтобы путём несложного расчёта узнать, сколько времени прошло с момента гибели растения. А это позволяет сделать заключение и о том, когда существовало исследуемое древнее поселение.

Много ценных сведений дают меченые атомы и в геологоразведке. Естественно, что в поисках ядерного горючего — урана и тория — широко используют радиоактивные свойства этих элементов. Однако меченые атомы помогают также и разведчикам нефти.

При поисках нефти бурят разведочные скважины в районах, где может находиться нефть. Ранее по мере бурения из скважин доставали образцы пород. Анализируя эти породы, определяли характер строения и порядок расположения пластов, через которые проходит буровая скважина. Этот простой способ геологической разведки на деле оказывается весьма громоздким и дорогим. Чтобы достать один образец породы, необходимо поднять и развинтить бурильные трубы общей длиной иногда более километра. Естественно, что разведчики заинтересованы в других, более простых методах поиска.

Один из таких методов состоит в следующем. В скважину опускается счётчик Гейгера-Мюллера, регистрирующий радиоактивность горных пород, через которые проходит скважина. Различные породы обладают разной радиоактивностью. Глинистые породы, сланцы и фосфорные известняки имеют высокую радиоактивность, нефтеносные пески — низкую. Сравнивая в соседних скважинах изменение радиоактивности с глубиной, можно изучить характер залегания нефтяных пластов.

В другом методе используется то, что нейтроны по-разному отражаются от различных видов породы. Вследствие отражения возле источника нейтронов образуется «нейтронное облако», размеры которого зависят от окружающих пород. Нейтроны легко поглощаются стабильными ядрами и при этом возникают кванты гамма-лучей. Если облако нейтронов будет невелико, то кванты будут зарождаться вблизи источника нейтронов. Если же нейтронное облако увеличится в размере, то количество гамма-квантов, возникающих вблизи источника нейтронов, уменьшится, а на больших расстояниях от него возрастёт. Поместим на расстояние 60—80 *см* от источника нейтронов счётчик Гейгера-Мюллера. При прохождении нефтеносного пласта нейтронное облако сильно уменьшается в своих размерах и показания счётчика резко снижаются.

Чтобы дать представление о степени применения меченых атомов в нефтеразведке в СССР, укажем, что ещё в 1954 г. этими способами было обследовано 3,5 миллиона метров разрезов скважин. В результате обследования многие из старых заброшенных скважин были возвращены в строй.

Меченые атомы могут сыграть важную роль и при эксплуатации нефтепроводов. Обычно по трубопроводу передают какой-то определённый вид нефтепродуктов. Для каждого вида нефтепродуктов надо строить свой трубопровод. Происходит это потому, что при отправке через один и тот же трубопровод партий различных нефтепродуктов, приёмщик не знает, когда прибудет тот или иной нефтепродукт. Применение меченых атомов легко устраняет это затруднение. Допустим, что надо прекратить отправку одного вида нефтепродуктов, например мазута, и начать отправку другого. Тогда в последнюю бочку мазута подмешивают растворяющееся в мазуте радиоактивное вещество. Когда на

приёмный пункт прибывает эта порция мазута, то показания счётчика Гейгера-Мюллера устанавливают, что перекачка мазута кончается и надо переходить на приём другого нефтепродукта.

Регистрация меченых атомов отличается необычайной чувствительностью. Для обнаружения присутствия радиоактивных веществ достаточно самого ничтожного их количества. Эта особенность радиоактивных веществ находит ряд важных применений.

На электролизных предприятиях отработанный электролит приходится сбрасывать в реку. Однако прямо это сделать нельзя, ибо электролит содержит вредные примеси, попадание которых в реку недопустимо. Эти вредные примеси задерживаются системой фильтров. Чрезвычайно важным является установление момента насыщения фильтра, то есть потери фильтром своей поглощающей способности. С этой целью в электролизную ванну подмешивают соответствующее радиоактивное вещество, «метящее» вредную примесь. Это вещество вместе с электролитом проходит через фильтр и задерживается в нём вместе с теми примесями, которые необходимо отфильтровать. Когда фильтр оказывается насыщенным и перестаёт задерживать вредные примеси, радиоактивные вещества начинают проникать сквозь него, что может быть легко зарегистрировано счётчиком, поставленным позади фильтра.

При помощи меченых атомов можно следить за движением вредных газов в цехах, определять места, где «застаиваются» газы, решать вопросы, связанные с выбором рационального устройства дымоходов, вентиляционных установок и т. п.

Серьёзную помощь могут оказать меченые атомы машиностроителям. Издавна машиностроители ведут борьбу за увеличение долговечности машин, стойкости отдельных, наиболее интенсивно работающих деталей. Борьба с износом — выбор смазки надлежащего качества, подбор таких сплавов, которые при трении друг о друга дают наименьший износ — является одной из важнейших задач в машиностроении. Решение этих задач обычными способами требует огромного времени, так как испытания на износ весьма длительны. Применение меченых атомов значительно упрощает задачу.

Трущиеся поверхности делают радиоактивными либо путём облучения нейтронами, либо добавкой в сплав, из которого отливаются исследуемые детали, радиоактивных веществ, либо путём запрессовки радиоактивных веществ в отдельные участки детали. При трении мельчайшие частицы металла отрываются от трущихся поверхностей и попадают в смазочное масло. Поместив в баке, где находится смазка, счётчик Гейгера-Мюллера, можно зарегистрировать появление в смазке самых незначительных следов радиоактивности и сделать заключение о степени износа трущихся поверхностей задолго до появления на них каких-либо видимых следов износа. Время испытаний на износ сокращается в десятки раз. Кроме того, появляется возможность испытывать не отдельные детали или лабораторные образцы, а непосредственно сами работающие машины в нормальных условиях их эксплуатации. Накладывая на разные части машин «метки» из различных радиоактивных веществ, можно по появлению соответствующей радиоактивности в смазке, судить о степени износа различных частей машины.

В металлургии меченые атомы применяются для контроля выплавки стали. Они позволяют весьма быстро производить проверку химического состава стали, а также устанавливать, откуда попадают в металл вредные примеси. Так, например, сера (весьма нежелательная примесь в стали) может попадать в сталь как из кокса, так и из самой шихты. Добавляя в партию угля, подготовленного к загрузке в печь, уголь, содержащий «меченую» серу, можно установить, какая часть серы в результате плавки переходит в металл из угля и шихты.

Меченые атомы помогают сортировать сталь. Известно, каким сложным и неприятным делом является установление сорта образцов стали, если почему-либо у неё нет паспорта. Примешивание к определённым сортам стали различных радиоактивных примесей (в количествах, не влияющих на свойства стали) позволяет легко определять марку различных кусков стали, не прибегая к химическому анализу.

Меченые атомы помогают следить за уровнем шихты в доменных печах. Если по одну сторону печи поместить радиоактивное вещество, испускающее гамма-лучи (например, кобальт 60), а по другую сторону — счётчик Гейгера-

Мюллера (рис. 63), то, так как шихта поглощает значительную часть проходящих через неё гамма-лучей, показания счётчика резко изменятся при опускании шихты ниже уровня AB. Сигнал от счётчика заставит сработать автоматическое устройство, управляющее загрузкой печей, и нужный уровень шихты будет немедленно восстановлен. Радиоактивные уровнемеры могут быть использованы и в целом ряде других производств.

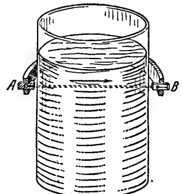


Рис. 63. Определение уровня шихты при помощи счётчика Гейгера-Мюллера.
A — источник гамма-лучей, B — счётчик.

Меченые атомы являются великолепным способом производственного контроля. Поглощение радиоактивного излучения зависит не только от свойств самого радиоактивного излучения, но и от свойств поглощающей среды — её состава, плотности, толщины. Зависимость поглощения от толщины может быть использована при контроле прокатки, особенно при прокатке фольг. Так как фольги имеют небольшую толщину, то малейшее изменение в степени обжима заметно сказывается на толщине фольги. Небольшая толщина фольги позволяет работать с бета-излучателями ($^{45}_{20}Ca$, $^{203}_{81}Tl$, $^{89}_{38}Sr$). Бета-излучение заметно поглощается уже сравнительно тонкими фольгами, поэтому изменение толщины фольги тотчас же отразится на поглощении бета-лучей, что и будет отмечено показаниями счётчиков Гейгера-Мюллера.

Замечательно то, что определение толщины фольги может быть осуществлено без непосредственного контакта с самой фольгой (рис. 64). При помощи счётчика Гейгера-Мюллера можно не только отмечать изменение толщины фольги, но и автоматически приводить в движение устройство, изменяющее степень обжима, поддерживая толщину прокатываемой фольги неизменной.

Иногда требуется сохранять не толщину самого объекта, а толщину покрытия, наносимого на тот или иной объект.

Такая задача возникает, например, в типографском деле или в текстильной промышленности. При изготовлении искусственного шёлка существенное значение имеет покрытие нити специальным веществом — олеиновокислым натрием. Если нить покрыта олеиновокислым натрием равномерно, то и краска на неё ложится равномерно. Если же нить покрыта неравномерно, то и краска ложится на неё неравномерно, изделие бракуется. Для устранения этого вида брака к нормальному олеиновокислому натрию подмешивается примесь, меченая радиоактивным натрием, а рядом с выходящей из ванны нитью помещают счётчик Гейгера-Мюллера. Как только толщина покрытия отклонится от нормы, счётчик тотчас же отметит изменение радиоактивности. Сигналы счётчика воздействуют на аппарат, управляющий скоростью движения нити через ванну. Если слой покрытия становится толще нормального, то движение нити ускоряется, что приводит к уменьшению толщины покрытия.

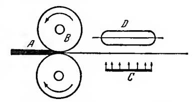


Рис. 64. Измерение толщины фольги при помощи счётчика Гейгера-Мюллера.
A — фольга; *B* — обжимные валки; *C* — источник бета-лучей; *D* — счётчик.

Огромное значение и многочисленные применения имеют меченые атомы в химии. Пользуясь ими, можно контролировать полноту отдельных химических манипуляций (осаждения, вымывания и др.), находить пути для улучшения технологии, автоматизировать процессы разделения и химической очистки. Применение таких установок, автоматически следящих за ходом химических процессов, может привести к огромной экономии средств.

Меченые атомы позволяют контролировать надёжность химического анализа. Особенное значение имеет так называемый *активационный анализ*. Сущность активационного анализа состоит в следующем. Если исследуемое вещество облучить потоком нейтронов, то часть атомов стабильных изотопов, находящихся в данном веществе, захватив нейтроны, превращается в радиоактивные изотопы. Установив по характеру излучения, какие именно радиоактивные изо-

топы образовались, можно судить о наличии в данном веществе примесей тех или других элементов.

Активационный анализ позволяет обнаруживать ничтожно малые примеси. Для ряда веществ существенную роль играет присутствие ничтожно малого количества примесей, измеряемых порой миллионными долями процента. К таким веществам относятся, в частности, полупроводники (германий, кремний и др.), из которых делают выпрямители, фотоэлементы и другие важные приборы. Наличие в полупроводниках некоторых примесей в количествах, совершенно не обнаруживаемых обычными химическими методами, существенно сказывается на физических и химических свойствах, делая эти материалы совершенно непригодными для использования. Получение чистых полупроводников стало возможным только в результате применения активационного анализа.

Гамма-излучение кобальта 60 и некоторых других радиоактивных источников позволяет просвечивать толстые слои металла и обнаруживать скрытые внутри дефекты. Оно с успехом используется для лечения многих заболеваний, в том числе некоторых злокачественных опухолей, что позволяет заменить дорогостоящий и малораспространённый радий, используемый для тех же целей.

Бета-излучение в больших дозах весьма разрушительно действует на микроорганизмы. Это позволяет осуществлять холодную (без кипячения) стерилизацию различных пищевых продуктов. Продукты, облучённые радиоактивными лучами, становятся пригодными для длительного хранения. Например, яблоки, облучённые бета-лучами, могут в течение трёх месяцев храниться в теплой комнате.

Под действием интенсивного радиоактивного излучения совершаются многие химические процессы, которые в обычных условиях не происходят. Например, установлено, что облучение гамма-лучами помогает образованию плексигласа. Плексиглас образуется из молекул сложного вещества, называемого метиловым эфиром метакриловой кислоты. Под влиянием высокой температуры и при одновременном действии некоторых активаторов эти молекулы соединяются в длинные цепочки. При этом движение молекул затрудняется и вся масса густеет. Однако образование длинных цепей продолжается только до определённого момента, что за-

трудняет получение толстых плит из плексигласа. Под влиянием облучения гамма-лучами от радиоактивного кобальта процесс образования плексигласа идёт без подогрева и активирующих веществ и при этом, что особенно важно, образуются значительно более длинные цепи.

Облучение готового плексигласа гамма-лучами вызывает возникновение газов в нём. При подогреве кусок плексигласа, предварительно облучённый гамма-лучами, резко увеличивается в объёме, превращаясь в белоснежный пористый и лёгкий пенопласт, замечательный по своим теплоизолирующим свойствам.

Из приведённых примеров видно, какое огромное применение имеют меченые атомы в народном хозяйстве и как велика область их дальнейшего использования.

ГЛАВА XIV

ТЕРМОЯДЕРНЫЕ РЕАКЦИИ

Об энергии связи на одну ядерную частицу

В атомном реакторе используется энергия, освобождаемая в результате деления ядер. Однако процесс деления является не единственным возможным источником атомной энергии. Существуют и другие пути получения атомной энергии. Чтобы уяснить это, рассмотрим прежде всего значения энергий связи различных ядер.

Мы уже знаем, что при соединении отдельных частиц в ядре освобождается энергия, равная энергии связи. Ядро всегда обладает меньшей энергией, чем сумма энергий отдельных свободных частиц, образовавших это ядро. Чем больше выделяется энергии при образовании ядра, тем ядро прочнее, тем больше надо затратить энергии, чтобы разложить его на составные части. При анализе свойств атомных ядер удобно пользоваться так называемой *удельной энергией связи*, или, иначе говоря, *величиной энергии связи, приходящейся на одну ядерную частицу*. Так как общее число частиц в ядре равно массовому числу A, то удельная энергия связи w и энергия связи ядра W связаны простым соотношением

$$w = \frac{W}{A}.$$

Значения w и W у разных ядер различны. Сопоставление значений w позволяет определить, будет ли при рассматриваемом ядерном превращении энергия выделяться или поглощаться. Так как w характеризует энергию, выделившуюся при образовании ядра, то, очевидно, если мы перенесём ядерные частицы из одного ядра со значением удельной энергии связи w_1 в другое ядро со значением энергии

связи $w_2 > w_1$, произойдёт освобождение энергии в количестве, равном произведению числа перенесённых частиц на разность $(w_2 - w_1)$. Если же $w_2 < w_1$, то на перенос каждой частицы в новое ядро придётся затратить в среднем энергию, равную $(w_1 - w_2)$. Следовательно, *переход ядерных частиц в новое ядро с большей удельной энергией связи будет сопровождаться выделением энергии, обратный переход — поглощением энергии.*

В настоящее время значение энергии связи установлено для очень многих ядер, поэтому можно заранее выяснить, какие ядерные превращения являются энергетически выгодными.

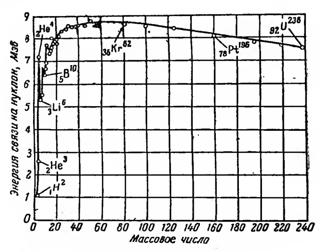


Рис. 65. Удельная энергия связи атомных ядер.

На рис. 65 представлена кривая зависимости удельной энергии связи от числа частиц (нуклонов) в ядре. Изучение этой кривой позволяет сделать ряд важных выводов:

1. Существует различие в величине удельной энергии связи между лёгкими, средними и тяжёлыми ядрами. Наиболее прочно связаны ядерные частицы в ядрах, содержащих 100—150 ядерных частиц. У таких ядер удельная энергия связи равна 8,4—8,6 миллиона электрон-вольт.

2. Тяжёлые ядра, такие, как уран или торий, имеют величину удельной энергии связи, равную приблизительно 7,5 миллиона электрон-вольт — меньше, чем у ядер среднего веса. Поэтому при превращении тяжёлых ядер в ядра среднего веса выделяется энергия. Такое превращение и происходит при делении тяжёлого ядра на два осколка. При этом удельная энергия связи уменьшается на 0,9—1,0 миллиона электрон-вольт, а так как в ядре урана содержится 235 частиц, то освобождаемая энергия оказывается примерно равной 200 миллионам электрон-вольт.

3. Удельная энергия связи у лёгких ядер также меньше, чем у средних. Поэтому *и при соединении лёгких ядер друг с другом (синтезе ядер) должно происходить выделение энергии.*

Об энергии, выделяющейся при синтезе ядер

Рассмотрим примеры соединения различных ядер. Допустим, что произошло превращение

$$^{16}_{8}O + ^{16}_{8}O \rightarrow ^{32}_{16}S,$$

т. е. слияние двух ядер кислорода 16 с образованием ядра серы 32. Масса атома серы равна 31,982 атомной единицы, масса каждого из атомов кислорода равна 16 атомным единицам. Поэтому при таком слиянии должна освободиться энергия, равная приблизительно 18 миллионам электрон-вольт. Конечно, эта энергия значительно меньше энергии освобождаемой при делении ядра урана. Однако надо иметь в виду, что масса двух ядер кислорода во много раз меньше массы ядра урана, и если отнести выделяемую энергию не к одному ядру, а к одинаковому весу «горючего», то различие между энергией деления урана и энергией слияния ядер кислорода будет не столь значительным. Энергия, выделившаяся при слиянии ядер одного грамма кислорода, составит 70% от энергии, выделяющейся при делении одного грамма урана 235.

Допустим теперь, что произошло превращение

$$^{23}_{11}Na + ^{22}_{10}Ne \rightarrow ^{45}_{21}Sc.$$

Из данных о величине массы этих ядер следует, что при таком превращении должна освободиться энергия, равная 26 миллионам электрон-вольт. Однако при расчёте на один

грамм оказывается, что при такой реакции выделяется столько же энергии, как и при слиянии ядер кислорода.

Рассмотренные примеры показывают, что при слиянии лёгких ядер выделяется значительное количество энергии, сравнимое с энергией, выделяющейся при делении тяжёлых ядер. Однако процесс слияния ядер является весьма маловероятным, так как для его осуществления надо затратить энергию на преодоление электрических сил отталкивания, обусловленных наличием значительного заряда у ядер. Для преодоления этих сил ядра кислорода должны были бы иметь кинетическую энергию порядка 10 миллионов электрон-вольт. Кинетическая энергия ядер неона или натрия должна быть ещё большей, ибо заряды этих ядер больше, чем у кислорода.

Конечно, при современных способах ускорения частиц можно ускорить ядра кислорода до энергии 10 миллионов электрон-вольт. Однако использование их для получения энергии совершенно нерентабельно, так как подавляющее большинство таких ядер растеряет свою энергию, не приблизившись ни к одному из ядер на расстояние, необходимое для слияния.

Значительно благоприятнее обстоит дело со слиянием более лёгких ядер, электрические силы отталкивания между которыми меньше. Допустим, что произошло соединение двух дейтронов в одно ядро гелия:

$$^{2}_{1}D + ^{2}_{1}D \rightarrow ^{4}_{2}He.$$

При таком превращении должна выделиться энергия, равная приблизительно 24 миллионам электрон-вольт, т. е. почти столько же, сколько выделяется при соединении ядер неона и натрия. Однако вес четырёх нуклонов равен приблизительно четырём атомным единицам, а вес $^{23}_{11}Na$ и $^{22}_{10}Ne$ равен 45 атомным единицам, т. е. в 11 раз больше. Если относить выделяемую энергию к единице веса «горючего», то оказывается, что при соединении двух дейтронов выделяется значительно больше энергии, чем при соединении ядер кислорода или ядер неона и натрия, а также и при делении ядер урана.

При делении одного грамма урана 235 освобождается энергия, равная приблизительно 22 000 киловатт-часов, а при соединении дейтронов в ядра гелия — 160 000 киловатт-

часов. Ещё большее количество энергии выделилось бы при образовании гелия путём слияния четырёх протонов: из одного грамма водорода 176 000 киловатт-часов.

Произведённое сопоставление энергии деления урана и энергии соединения водородных ядер в ядра гелия показывает, что последний процесс является энергетически более выгодным. Однако деление ядер, раз начавшись (при соблюдении условия $npk \geqslant 1$), может продолжаться само собой. А при соединении каждых двух ядер дейтерия или четырёх протонов необходимо преодолевать их взаимное отталкивание. Возникает поэтому вопрос, можно ли осуществить такие условия, при которых соединение ядер водорода будет происходить самостоятельно.

Оказывается, что такие условия могут быть осуществлены.

Термоядерные реакции

Между ядрами действуют электрические силы отталкивания, препятствующие слиянию ядер. Слияние может произойти, если ядра будут обладать большой кинетической энергией, достаточной для преодоления действия сил отталкивания. Однако и при несколько меньших энергиях взаимодействующих ядер процесс слияния также оказывается возможным, правда, уже далеко не при каждом соударении. Понадобится осуществить много соударений данного ядра с другими, прежде чем произойдёт слияние с каким-либо ядром.

Процесс слияния ядер, имеющих небольшую кинетическую энергию, носит статистический характер. Это значит, что нельзя заранее установить, при каком именно соударении осуществится слияние соударяемых ядер. В среднем слияние будет происходить после некоторого определённого числа соударений. Поэтому мы можем охарактеризовать такой процесс при помощи так называемой *вероятности проникновения*. Если вероятность проникновения будет малой, то соединения ядер при соударении будут происходить столь редко, что потребуется огромное количество соударений, пока осуществится слияние каких-то двух ядер. Вероятность слияния ядер сильно зависит от их кинетической энергии. С увеличением энергии эта вероятность резко возрастает.

Таблица XII даёт представление о величине этой вероятности для случая соединения двух ядер тяжёлого водорода в ядро гелия.

Таблица XII

Кинетическая энергия дейтрона в электрон-вольтах	Вероятность слияния	Кинетическая энергия дейтрона в электрон-вольтах	Вероятность слияния
100	10^{-60}	2 500	10^{-12}
400	10^{-30}	10 000	10^{-6}
900	10^{-20}	40 000	10^{-3}
1 600	10^{-15}		

Приведённые в ней данные показывают, что вероятность слияния дейтронов оказывается довольно значительной уже при сравнительно небольших энергиях. Например, при энергии в 10 000 электрон-вольт слияние ядер осуществляется в среднем на миллион соударений. Как ни мала эта энергия по сравнению с энергией, выделяющейся при образовании ядра гелия (24 миллиона электрон-вольт), всё же ускорять ионы тяжёлого водорода для осуществления реакции

$$^{2}_{1}D + ^{2}_{1}D \longrightarrow ^{4}_{2}He$$

невыгодно. Как уже указывалось, ионизационные потери у заряженных ядер слишком велики и ионы при прохождении через вещество (содержащее атомы тяжёлого изотопа водорода) теряют свою энергию раньше, чем наступает благоприятный случай соединения двух дейтронов.

Однако можно сообщать энергию дейтронам путём нагревания. Известно, что с повышением температуры увеличивается кинетическая энергия атомов и молекул. Средняя кинетическая энергия атомов и молекул при температуре 20° С небольшая: она составляет всего лишь $^{3}/_{80}$ электрон-вольта. Для сообщения молекулам газа, жидкости или твёрдого тела средней кинетической энергии, равной одному электрон-вольту, надо осуществить подогрев до 7500 градусов. Но при такой энергии вероятность слияния ядер столь ничтожна (10^{-600}), что подобные реакции просто не происходят. Для того чтобы сообщить ядрам водорода энергию, достаточную для их синтеза, надо нагревать вещество до значительно более высокой температуры.

Если подогреть тяжёлый водород до одного миллиона градусов, то положение существенно изменится. При такой температуре средняя кинетическая энергия дейтронов равна приблизительно 130 электрон-вольтам, а вероятность их слияния при этой энергии всё ещё ничтожна (приблизительно 10^{-50}). Однако 130 электрон-вольт являются лишь средней кинетической энергией ядер. Часть ядер будет обладать значительно большей энергией. Небольшая доля дейтронов (10^{-8}) будет иметь энергию, заключённую в интервале 1600—2500 электрон-вольт. Вероятность слияния дейтронов с такой энергией уже не столь мала. Она равна 10^{-15}—10^{-12}. Если учесть, что в веществе при температуре в 1 миллион градусов каждый из атомов будет испытывать приблизительно 10^{10} столкновений в секунду и что в одном килограмме тяжёлого водорода содержится $3 \cdot 10^{26}$ дейтронов, то станет ясно, что при этих условиях будет осуществляться значительное число случаев образования гелия путём соединения двух дейтронов. Подсчёт показывает, что при температуре в 1 миллион градусов в одном килограмме дейтронов в результате их слияния ежесекундно будет выделяться энергия, равная приблизительно 100 киловаттам. При температуре в 5—6 миллионов градусов весь килограмм дейтронов «сгорит» за доли секунды, выделив энергию, равную 150 миллионам киловатт-часов.

Итак, мы видим, что при достаточно высоких температурах реакция слияния дейтронов может происходить. При температуре в несколько миллионов градусов будет весьма эффективно происходить превращение

$$^{1}_{1}\mathrm{H} + ^{7}_{3}\mathrm{Li} \rightarrow 2\,^{4}_{2}\mathrm{He},$$

в ходе которого также выделяется значительная энергия (около 17 миллионов электрон-вольт).

Ядерные реакции, происходящие при высоких температурах, принято называть *термоядерными реакциями*. Реакции

$$^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{2}_{1}\mathrm{D} \rightarrow ^{4}_{2}\mathrm{He},$$
$$^{2}_{1}\mathrm{D} + ^{7}_{3}\mathrm{Li} \rightarrow 2\,^{4}_{2}\mathrm{He} + ^{1}_{0}n$$

являются примерами термоядерных реакций.

Мы установили, что при температуре порядка миллиона градусов термоядерные реакции могут происходить с до-

статочной эффективностью. Осуществляются ли где-либо в природе подобные условия? Оказывается, что именно такие высокие температуры господствуют в недрах звёзд. Поэтому там происходят различные термоядерные реакции.

Вопрос об источниках энергии Солнца и звёзд долгое время оставался загадкой, занимавшей пытливую мысль учёных. Почему светят звёзды? Почему светит Солнце, являющееся одной из относительно небольших звёзд? Из каких источников черпает оно свою энергию?

Известно, что Солнце излучает колоссальное количество энергии. Мощность солнечного излучения выражается громадным числом $3{,}5 \cdot 10^{23}$ киловатт. Она в миллиард раз больше того, что могут дать сто миллионов таких гидростанций, как строящаяся на Ангаре Братская ГЭС. Откуда же берётся эта поистине гигантская энергия?

Простые подсчёты показывают, что обычные источники не могут обеспечить такого интенсивного выделения энергии. Одним из наиболее широко распространённых источников энергии на земле является процесс горения. При сгорании 1 *кг* угля выделяется около 8000 больших калорий. Если допустить, что Солнце целиком состоит из углерода и соответствующего (необходимого для полного сгорания) количества кислорода, то при сгорании всего углерода должно было бы выделиться $4 \cdot 10^{33}$ больших калорий. При упомянутой уже мощности излучения Солнце ежегодно излучает количество тепла, равное $2{,}6 \cdot 10^{30}$ больших калорий. Следовательно, если бы источником солнечной энергии было горение углерода, Солнце должно было бы полностью сгореть немногим более чем за тысячу лет. Между тем мы хорошо знаем, что Земля и вся наша солнечная система, существуют по крайней мере несколько миллиардов лет. Это значит, что излучение звёзд обусловлено действием значительно более мощных источников энергии, нежели обычные химические реакции. Такими мощными источниками энергии являются термоядерные реакции. Они-то и представляют один из важнейших источников звёздной энергии.

Повидимому, на некоторых стадиях развития звёзд энергия, теряемая звездой, полностью создаётся термоядерными реакциями, идущими в её недрах. Какие же термо-

ядерные реакции являются источником солнечной энергии? Ответ на этот вопрос дал Бете.

Астрономы подсчитали, что внутри Солнца температура достигает 20 миллионов градусов. Если бы внутри Солнца находился тяжёлый водород, то при этой температуре образование гелия протекало бы с такой быстротой, что произошёл бы взрыв Солнца. Реакция

$$^{2}_{1}D + ^{1}_{1}H \rightarrow ^{3}_{2}He$$

могла бы полностью обеспечить энергию, теряемую Солнцем, уже при температуре в центре его всего лишь в 400 000 градусов. Реакция

$$^{7}_{3}Li + ^{1}_{1}H \rightarrow 2\,^{4}_{2}He$$

также, повидимому, не может быть источником солнечной энергии, ибо и эта реакция при 20 миллионах градусов протекает слишком бурно. Повидимому, рассмотренные термоядерные реакции определяют излучение звёзд на ранних этапах развития.

При температуре порядка 20 миллионов градусов с достаточной интенсивностью могут происходить термоядерные реакции, получившие название углеродно-азотного цикла.

Что же представляет собой углеродно-азотный цикл? Этот цикл состоит из целой группы термоядерных реакций. Он начинается с превращения, происходящего при проникновении протона в ядро углерода 12. В результате этого превращения возникает азот 13. Этот изотоп радиоактивен и распадается с испусканием позитрона. В результате возникает устойчивый изотоп углерод 13. Второй этап углеродно-азотного цикла происходит с ядром углерода 13. При проникновении в это ядро протона образуется ядро азота 14. Изотоп азот 14 стабилен. Следующим этапом является термоядерная реакция проникновения третьего протона в ядро азота 14. В результате этого образуется изотоп кислород 15. Он радиоактивен и распадается с испусканием позитрона, превращаясь в изотоп азот 15. Последним этапом углеродно-азотного цикла является термоядерная реакция проникновения протона в ядро азота 15. В результате образуется ядро углерода 12 и ядро гелия 4.

Все эти превращения могут быть записаны следующим образом:

$$^{12}_{6}C + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{13}_{7}N^{*} + \text{излучение},$$
$$^{13}_{7}N^{*} \longrightarrow ^{13}_{6}C + _{+1}^{0}e,$$
$$^{13}_{6}C + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{14}_{7}N + \text{излучение},$$
$$^{14}_{7}N + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{15}_{8}O^{*} + \text{излучение},$$
$$^{15}_{8}O^{*} \longrightarrow ^{15}_{7}N + _{+1}^{0}e,$$
$$^{15}_{7}N + ^{1}_{1}H \longrightarrow ^{16}_{8}O^{*} \longrightarrow ^{12}_{6}C + ^{4}_{2}He.$$

В результате описанных превращений снова получается ядро углерода 12, с которого и начался углеродно-азотный цикл. При этом, однако, исчезают четыре протона и вместо них возникает ядро гелия. Следовательно, по своим результатам углеродно-азотный цикл равноценен соединению четырёх протонов в ядро гелия:

$$4^{1}_{1}H \longrightarrow ^{4}_{2}He + 2 \text{ позитрона} + \text{излучение}.$$

Общее количество энергии, выделяемой в результате углеродно-азотного цикла, равно 26,8 миллиона электронвольт.

Таким образом, согласно Бете, источником солнечной энергии является превращение водорода в гелий, осуществляемое не прямо, а посредством углеродно-азотного цикла. Количество водорода на Солнце в настоящее время таково, что согласно этой теории его хватит для образования энергии, расходуемой Солнцем на излучение, ещё на восемьдесят миллиардов лет.

Теория Бете довольно хорошо объясняет происхождение солнечной энергии. Однако нельзя считать, что излучение Солнца определяется только углеродно-азотным циклом. Возможно, что наряду с этим циклом в недрах Солнца происходят и другие термоядерные реакции. Для окончательного решения вопроса об источниках звёздной энергии наших сегодняшних знаний оказывается недостаточно.

Водородная бомба

В недрах звёзд существуют особые условия — высокая температура и большие давления,— при которых осуществляются различные термоядерные реакции. Аналогичные

условия на короткое время возникают и при взрыве атомной бомбы — температура, измеряемая многими миллионами градусов, и давления, доходящие до ста миллионов тонн на квадратный сантиметр. В этих условиях также может начаться термоядерная реакция. Поскольку условия, пригодные для развития термоядерной реакции, существуют очень короткое время, успеют развиться только такие термоядерные реакции, которые протекают чрезвычайно быстро. Из различных возможных термоядерных реакций:

$$ {}_1^2\mathrm{D} + {}_1^1\mathrm{H} \rightarrow {}_2^3\mathrm{He} + \text{излучение}, $$
$$ {}_1^2\mathrm{D} + {}_1^2\mathrm{D} \rightarrow {}_1^3\mathrm{T} + {}_1^1\mathrm{H}, $$
$$ {}_1^3\mathrm{T} + {}_1^1\mathrm{H} \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + \text{излучение}, $$
$$ {}_1^3\mathrm{T} + {}_1^2\mathrm{D} \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + {}_0^1n, $$

только последняя развивается с достаточной быстротой (порядка 10^{-6} секунды). Эта реакция и была использована при создании водородной бомбы.

Водородная бомба имеет очень прочную оболочку, внутри которой размещена обычная атомная бомба и сосуд, содержащий дейтерий и тритий. Атомный взрыв, создавая условия, необходимые для протекания термоядерной реакции в водороде, как бы «поджигает» водородную бомбу.

Изотоп водорода с массой 3 — тритий (${}_1^3\mathrm{T}$), входящий в состав водородной бомбы, не является стабильным. Он радиоактивен и распадается наполовину за 12 лет. Тритий можно получить путём следующих реакций:

$$ {}_3^6\mathrm{Li} + {}_0^1n \rightarrow {}_2^4\mathrm{He} + {}_1^3\mathrm{T}, $$
$$ {}_1^2\mathrm{D} + {}_0^1n \rightarrow {}_1^3\mathrm{T}, $$
$$ {}_2^3\mathrm{He} + {}_0^1n \rightarrow {}_1^3\mathrm{T} + {}_1^1\mathrm{H}, $$
$$ {}_4^9\mathrm{Be} + {}_1^2\mathrm{D} \rightarrow {}_1^3\mathrm{T} + 2\,{}_2^4\mathrm{He}, $$
$$ {}_1^2\mathrm{D} + {}_1^2\mathrm{D} \rightarrow {}_1^3\mathrm{T} + {}_1^1\mathrm{H}. $$

Первые три реакции проходят в атомных реакторах, последние две — в циклотронах.

Мощность водородных бомб больше, чем атомных. Мощность атомной бомбы ограничена наличием критической массы у ядерного взрывчатого вещества делящегося типа. Критическая масса ограничивает количество урана или плутония, которое может быть применено для зарядки бом-

бы. Для водородных бомб не существует никаких критических размеров. Поэтому мощность водородных бомб ограничена только техническими возможностями (количеством трития, условием транспортировки бомб и т. д.).

Водородные бомбы разработаны в США и в Советском Союзе. В конце 1955 г. в нашей стране был осуществлён водородный взрыв, самый мощный из всех, когда-либо произведенных до сих пор. В целях предотвращения опасных последствий его произвели на большой высоте. Одновременно с взрывом производились широкие исследования по вопросам защиты людей.

Советский Союз не проводит агрессивной политики и никому не угрожает атомным и водородным оружием. Атомное оружие разрабатывается в СССР только в целях самозащиты. Наш народ неутомимо и последовательно борется за запрещение всех видов оружия массового уничтожения людей, в том числе атомного и водородного оружия, за прекращение производства и уничтожение запасов уже произведённых бомб. В сообщении ТАСС, опубликованном по поводу последнего испытания нашей водородной бомбы, сказано: «Советское правительство стояло и стоит за запрещение атомного и водородного оружия с установлением действенного международного контроля. Такое решение позволило бы направить использование атомной энергии исключительно на мирные цели. Предложения насчёт безусловного запрещения атомного и водородного оружия делались Советским Союзом как в Организации Объединённых Наций, так и на недавнем Совещании министров иностранных дел четырёх держав в Женеве, но не были приняты. Советский Союз внёс также предложение о морально-политическом осуждении атомного и водородного оружия. Западные державы отказались принять и это предложение.

Проводя указанные испытания в интересах обеспечения своей безопасности, Советский Союз попрежнему будет добиваться в Организации Объединённых Наций соглашения о запрещении атомного и водородного оружия и о сокращении всех других видов вооружений, о дальнейшем уменьшении международной напряжённости и установлении доверия между государствами, о поддержании и укреплении всеобщего мира».

Об управляемой термоядерной реакции

Взрыв водородной бомбы показал, что термоядерную реакцию можно осуществить искусственно. При взрыве водородной бомбы в течение короткого промежутка времени выделяется огромное количество энергии. Если бы скорость выделения энергии при термоядерной реакции можно было уменьшить, сделав процесс освобождения энергии управляемым, то энергию, выделяющуюся при термоядерной реакции, можно было бы использовать на различные мирные цели. Перед учёными всего мира стоит теперь благородная задача — осуществление управляемой термоядерной реакции.

Управляемая термоядерная реакция поставит на службу человечества неисчислимые энергетические запасы. В настоящее время основными энергетическими ресурсами являются уголь, нефть, торф, накопившиеся в земле в течение длительного времени. При современном бурном развитии промышленности расходование энергии происходит столь стремительно, что сравнительно недалеко время, когда запасы нефти, угля и торфа окажутся исчерпанными. Осуществление цепной ядерной реакции выявило новые виды природного горючего — уран и торий. Имеющиеся на земле соединения урана и тория содержат запасы энергии, в 10—20 раз превосходящие энергию, содержащуюся в известных в настоящее время месторождениях нефти, угля и торфа. Использование урана и тория, конечно, значительно увеличивает наши энергетические ресурсы. В результате их применения энергетика получает новые возможности. Однако и эти виды горючего могут быть израсходованы в обозримый срок.

Использование энергии, выделяющейся при термоядерных реакциях, в корне меняет всё дело. Осуществление управляемой термоядерной реакции позволит навсегда решить энергетическую проблему, ибо сырьё для термоядерной реакции — водород — находится на Земле в огромных количествах.

Создание управляемой термоядерной реакции представляет труднейшую задачу. Советские учёные ведут в этой области весьма обширные и плодотворные исследования. В лекции, прочитанной в атомном центре Англии —

Харуэлле, И. В. Курчатов сообщил о некоторых из этих исследований.

В Академии наук СССР под руководством Л. А. Арцимовича и М. А. Леонтовича проведены работы, показавшие возможность получения при помощи газового разряда температуры порядка миллиона градусов. Такая высокая температура была получена в лабораторных условиях впервые.

При значительном повышении температуры в веществе могут развиться огромные давления. Поэтому для лабораторных опытов был избран разряд в газе, находящемся при комнатной температуре под пониженным давлением. Использование разряда в разреженном газе освободило учёных от необходимости создавать приборы с чрезвычайно прочными стенками, способными выдерживать громадные давления. При достаточном напряжении в разреженном газе возникает электрический разряд — появляются заряженные частицы — ионы и электроны. Чем большее количество ионов и электронов будет образовано в газе, тем больше электрический ток, проходящий через газ. Прохождение тока сопровождается выделением тепла, в результате чего газ нагревается. Однако повысить температуру газа сколько-нибудь значительно нельзя, ибо частицы, находящиеся в газе, сталкиваясь со стенками камеры, в которой происходит разряд, передают им тепло — нагревают их. При температуре в миллион градусов эта теплоотдача будет столь сильной, что без соответствующей тепловой изоляции частиц, участвующих в разряде, от стенок разрядной камеры, достижение температуры в миллион градусов оказывается невозможным.

А. Д. Сахаров и И. Е. Тамм нашли способ осуществить термоизоляцию газовой плазмы *). Предложенная ими идея проста. Мы знаем, что заряженные частицы, попадая в магнитное поле, искривляют свой путь. Сильное магнитное поле может заставить заряженные частицы двигаться по замкнутым кривым, в частности по окружности. Чем сильнее магнитное поле, тем меньше будет диаметр окружности, описываемой заряженными частицами. Если поместить газовую плазму в сильное магнитное поле, то можно заста-

*) Плазмой называют среду из положительно заряженных ионов и электронов. Плазма образуется при газовом разряде и является хорошим проводником электричества.

вить ионы и электроны двигаться в небольшом объёме. Сильное магнитное поле не допустит ионы к стенкам сосуда, и таким образом газовая плазма окажется изолированной от стенок разрядной камеры.

Газовая плазма, как мы уже отметили, является хорошим электрическим проводником, по ней можно пропускать большие электрические токи. Но вокруг электрических токов возникают магнитные поля. Если ток, идущий через плазму, будет достаточно велик, то он создаст сильное магнитное поле и тогда будут решены сразу обе задачи: при большом токе через плазму в ней будет выделяться значительное количество тепла, а с другой стороны, частицы плазмы благодаря сильному магнитному полю окажутся хорошо изолированными от стенок разрядной камеры и плазма сможет нагреться до высокой температуры. Следовательно, дело заключается в том, чтобы пропустить через разрядную камеру большой электрический ток. Это и удалось осуществить Л. А. Арцимовичу и его сотрудникам. Они пропускали через камеру кратковременные (импульсные) токи силой до двух миллионов ампер. Уже при токах в несколько сот тысяч ампер они обнаружили, что газовая плазма под влиянием магнитного поля начинает отделяться от стенок камеры и стягивается в узкий шнур. При токе в миллион ампер температура в этом шнуре достигает миллиона градусов.

Несомненно, что на пути к созданию управляемой термоядерной реакции достигнут большой успех — получены контролируемым образом температуры порядка миллиона градусов, небходимые для осуществления термоядерной реакции. Можно надеяться, что в сравнительно недалёком будущем управляемая термоядерная реакция станет совершившимся фактом и что советские учёные внесут свой достойный вклад в решение этой чрезвычайно важной задачи.

ПЕРИОДИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЭЛЕМЕНТОВ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

Периоды	Группы элементов: I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII			0
1	1H Водород 1,0080										2He Гелий 4,003
2	3Li Литий 6,940	4Be Бериллий 9,02	5B Бор 10,82	6C Углерод 12,010	7N Азот 14,008	8O Кислород 16,0000	9F Фтор 19,000				10Ne Неон 20,183
3	11Na Натрий 22,997	12Mg Магний 24,32	13Al Алю- миний 26,97	14Si Кремний 28,06	15P Фосфор 30,98	16S Сера 32,06	17Cl Хлор 35,457				18Ar Аргон 39,944
4	19K Калий 39,096	20Ca Кальций 40,08	21Sc Скандий 45,10	22Ti Титан 47,90	23V Ванадий 50,95	24Cr Хром 52,01	25Mn Марганец 54,93	26Fe Железо 55,85	27Co Кобальт 58,94	28Ni Никель 58,69	
4	29Cu Медь 63,57	30Zn Цинк 65,38	31Ga Галлий 69,72	32Ge Германий 72,60	33As Мышьяк 74,91	34Se Селен 78,96	35Br Бром 79,916				36Kr Криптон 83,7
5	37Rb Рубидий 85,48	38Sr Стронций 87,63	39Y Иттрий 88,92	40Zr Цирконий 91,22	41Nb Ниобий 92,91	42Mo Молибден 95,95	43Tc Технеций 99	44Ru Рутений 101,7	45Rh Родий 102,91	46Pd Палладий 106,71	
5	47Ag Серебро 107,880	48Cd Кадмий 112,41	49In Индий 114,76	50Sn Олово 118,70	51Sb Сурьма 121,76	52Te Теллур 127,61	53J Иод 126,92				54Xe Ксенон 131,3
6	55Cs Цезий 132,91	56Ba Барий 137,36	57La* Лантан 138,92	72Hf Гафний 178,6	73Ta Тантал 180,88	74W Вольфрам 183,92	75Re Рений 186,31	76Os Осмий 190,2	77Ir Иридий 193,1	78Pt Платина 195,23	
6	79Au Золото 197,2	80Hg Ртуть 200,61	81Tl Таллий 204,39	82Pb Свинец 207,21	83Bi Висмут 209,00	84Po Полоний 210	85At Астатин 210				86Rn Радон 222
7	87Fr Франций 223	88Ra Радий 226,05	89Ac** Актиний 227								

6	*58—71 Ряд лантанидов	58Ce Церий 140,13	59Pr Празеодим 140,92	60Nd Неодим 144,27	61Pm Прометий 147	62Sm Самарий 150,43	63Eu Европий 152,0	64Gd Гадолиний 156,9	65Tb Тербий 159,2	66Dy Диспрозий 162,46	67Ho Гольмий 164,94	68Er Эрбий 167,2	69 Tu Тулий 169,4	70Yb Иттербий 173,04	71Lu Лютеций 174,99
7	**90—101 Ряд актинидов	90Th Торий 232,12	91Pa Протакти- ний 231	92U Уран 238,07	93Np Нептуний 237	94Pu Плутоний 239	95Am Америций 243	96Cm Кюрий 245	97Bk Берклий 249	98Cf Калифор- ний 249	99E Эйнштей- ний 255	100Fm Фермий 255	101Mv Менделе- ний 256		

М. И. Корсунский

ПРИЛОЖЕНИЕ
(Рис. I—XLVII)

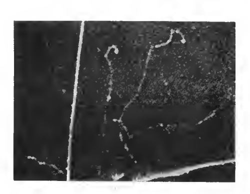


Рис. Ia. Фотографический снимок, полученный с камерой Вильсона. Прямые толстые линии — пути альфа-частиц. Тонкие изогнутые линии—пути медленных электронов.

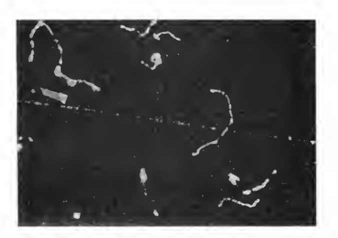


Рис. Iб. Фотографический снимок, полученный с камерой Вильсона. Изогнутые линии — следы медленных электронов. Прямая пунктирная линия—след электрона большой энергии.

Рис. II. Фотография следов альфа-частиц в камере Вильсона. На снимке видно, что все альфа-частицы, вылетевшие из радиоактивного вещества, проходят в камере Вильсона практически одинаковый путь.

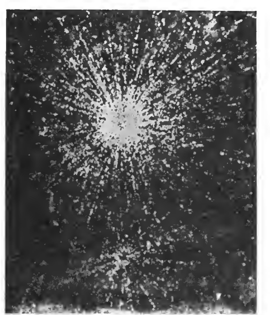


Рис. III. Микрофотография следов излучения радия в светочувствительном слое фотографической пластинки.

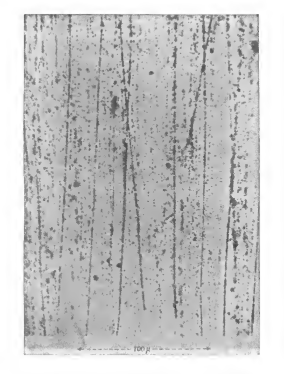
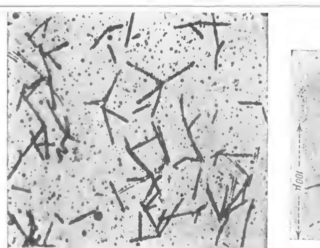


Рис. IV. Следы альфа-частиц и дейтронов, вышедших из 184-дюймового циклотрона, в эмульсии; частицы входят в эмульсию почти параллельно её поверхности. Оба типа частиц имеют одинаковые скорости. Различие в их удельной ионизации хорошо заметно: следы альфа-частиц более жирные, следы дейтронов более тонкие. Начальная энергия альфа-частиц 200 миллионов электрон-вольт, начальная энергия дейтронов 100 миллионов электрон-вольт.

Рис. V. Следы протонов и альфа-частиц в фотографической эмульсии.



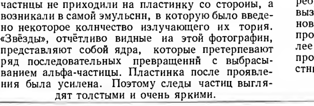


Рис. VI. Следы альфа-частиц в эмульсии. Альфа-частицы не приходили на пластинку со стороны, а возникали в самой эмульсии, в которую было введено некоторое количество излучающего их тория. «Звёзды», отчётливо видные на этой фотографии, представляют собой ядра, которые претерпевают ряд последовательных превращений с выбрасыванием альфа-частицы. Пластинка после проявления была усилена. Поэтому следы частиц выглядят толстыми и очень яркими.

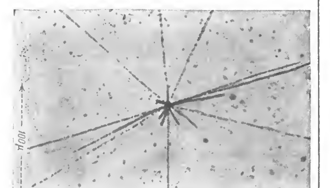


Рис. VII. Взрывное расщепление ядра, вероятно серебра, частицей космических лучей. Энергия частицы, вызвавшей расщепление, была порядка 100 миллионов электрон-вольт. Можно различить следы семи протонов, пяти альфа-частиц и некоторого числа более тяжёлых ядерных осколков. Большинство частиц проходит из эмульсии в стекло и выходит из пластинки, вследствие чего не удалось точно определить их пробеги, а следовательно, и энергии.

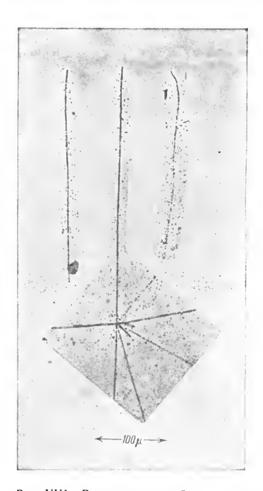


Рис. VIII. Расщепление тяжёлого ядра космическими лучами и следы мезотрона (справа вверху) и тритона (ядра сверхтяжёлого водорода ^3_1H) (слева вверху). Длинный след, идущий вверх от звезды, принадлежит альфа-частице.

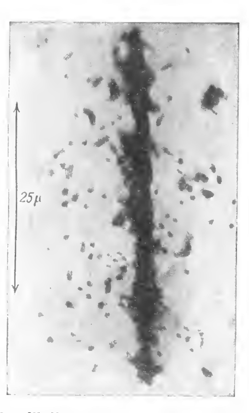


Рис. IX. Микрофотография следа космической частицы с большим зарядом ($Z = 15$).

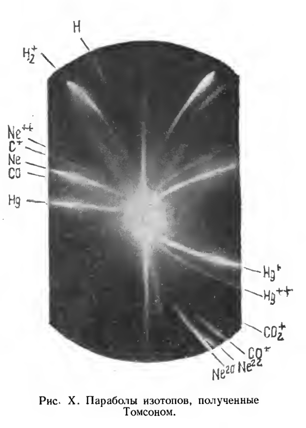


Рис. X. Параболы изотопов, полученные Томсоном.

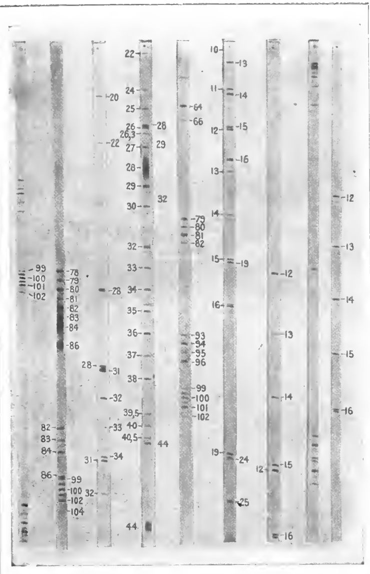


Рис. XI. Масс-спектрограммы ряда элементов с массовым числом в интервале от 12 до 104. Спектрограммы получены Астоном.

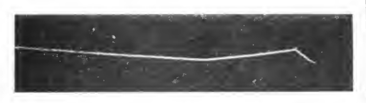


Рис. XII. След альфа-частицы, испытавшей два столкновения.

Рис. XIII. Пути альфа-частиц в камере Вильсона, наполненной кислородом.

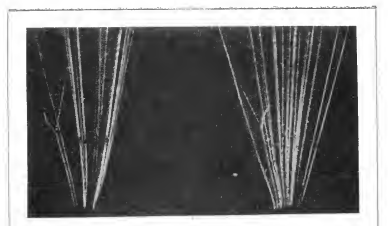


Рис. XIV. Следы альфа-частиц в азоте. Видна вилка, образованная альфа-частицей задолго до конца её пробега. Более тонкий след принадлежит протону. Более жирный — ядру, захватившему альфа-частицу.

Рис. XV. Расщепление азота альфа-частицами. Виден след выбитого протона, летящего в направлении, противоположном направлению альфа-частицы.

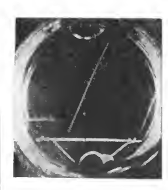


Рис. XVI. След протона, выбитого нейтроном из парафина.

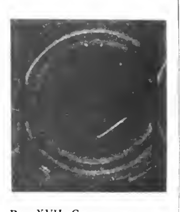


Рис. XVII. След ядра гелия, пришедшего в движение в результате столкновения с нейтроном.

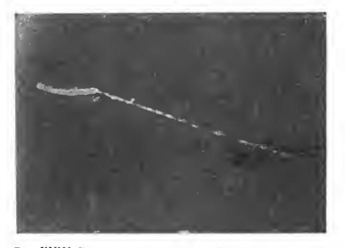


Рис. XVIII. Расщепление ядра азота нейтроном, происходящее по схеме ${}^{14}_{7}N + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{11}_{5}Be + {}^{4}_{2}He$. Тонкий след принадлежит альфа-частице; жирный — ядру бора, образовавшемуся при расщеплении ядра азота.

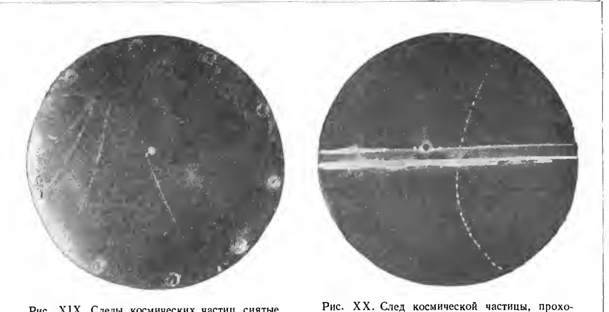


Рис. XIX. Следы космических частиц, сиятые Андерсоиом в камере Вильсоиа, помещёниой в магнитное поле 25 000 эрстед.

Рис. XX. След космической частицы, проходящей через свинцовую пластину толщиной 5 *мм*, помещённую внутри камеры Вильсона. Камера Вильсона находится в магнитном поле.

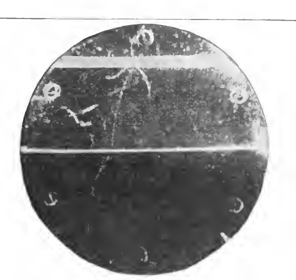


Рис. XXI. Позитрон, созданный гамма-лучами в свинцовой пластине (верхняя пластина) и прошедший сквозь алюминиевую пластину толщиной 0,5 *мм*. Энергия позитрона над алюминиевой пластиной 820 000 электрон-вольт, под алюминиевой пластиной 520 000 электрон-вольт.

Рис. XXII. Фотография возникновения пары в криптоне, полученная Л. В. Грошевым и И. М. Франком. След электрона отклонён вверх, позитрона — вниз.

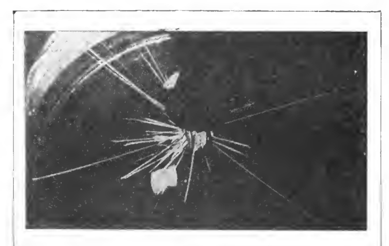


Рис. XXIII. Расщепление лития.

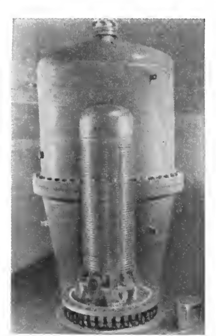


Рис. XXIV. Электростатический генератор под давлением. На снимке изображена двойная фотография. Сначала снята трубка, а затем кожух, внутри которого она помещена. Длина кожуха 3,05 *м*.

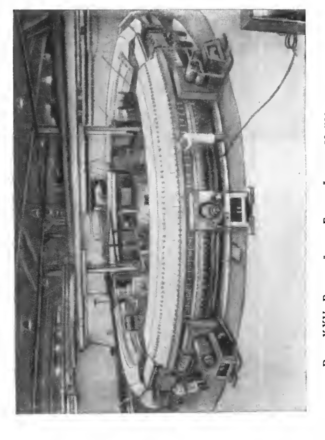


Рис. XXV. Внешний вид Брукхэйвенского космотрона.

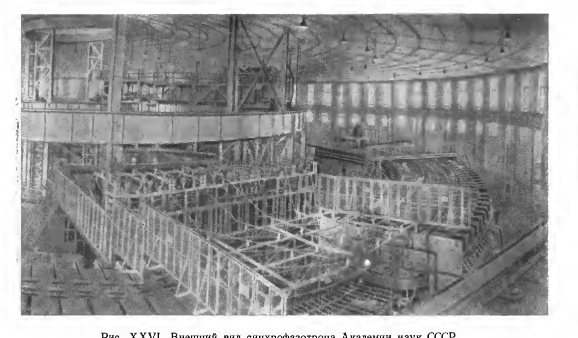


Рис. XXVI. Внешний вид синхрофазотрона Академии наук СССР.

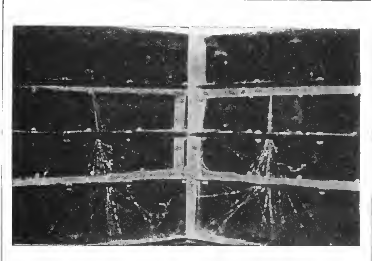


Рис. XXVII. Развитие ливня в свинцовых пластинах.

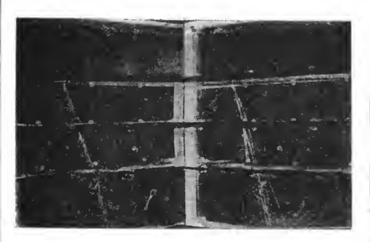


Рис. XXVIII. Развитие ливня в свинцовых пластинах.

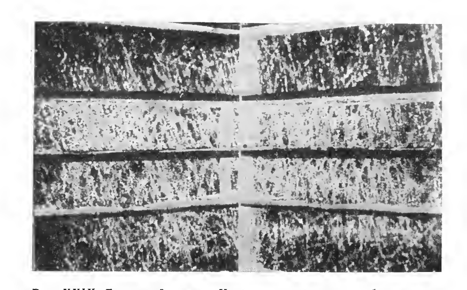


Рис. XXIX. Гигантский ливень. Частица, его вызвавшая, обладает энергией, большей чем 10^{12} электрон-вольт.

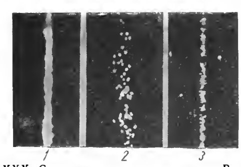


Рис. XXX. Следы различных частиц в камере Вильсона.
1 — след протона в кислороде; *2* — след электрона в водороде; *3* — след электрона в кислороде.

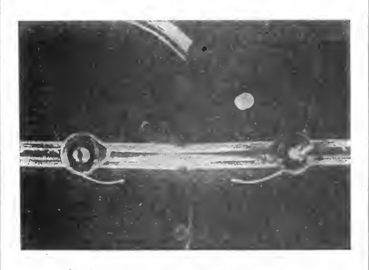


Рис. XXXI. След мезона. Мезон прошёл через счётчик, установленный посредине камеры Вильсона. Камера Вильсона находилась в магнитном поле. Андерсон и Неддермайер, получившие этот снимок, определили массу этой частицы, равной 220 электронным массам.

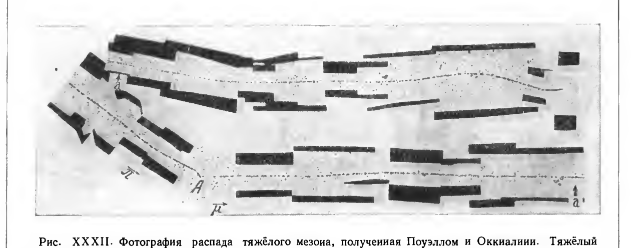


Рис. XXXII. Фотография распада тяжёлого мезона, полученная Поуэллом и Оккиалини. Тяжёлый мезон с массой 300 m_e (обозначенный буквой π) тормозится в фотопластинке. В конце пути, в точке A, он распадается. При этом возникает лёгкий мезон с массой 200 m_e (обозначенный буквой μ). Для удобства расположения след лёгкого мезона разделён на две части в точке a, указанной стрелкой, и конец его помещён вверху.

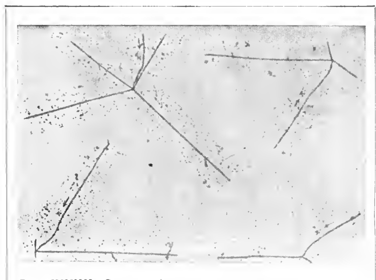


Рис. XXXIII. Следы в фотоэмульсии, показывающие распад лёгких ядер под действием π-мезонов.

Рис. XXXIV. Первичная космическая частица (ядро алюминия) столкнулась с ядром, находившимся в фотоэмульсии. Видны следы отдельных частиц, вылетевших из ядра. Среди них имеются следы мезонов.

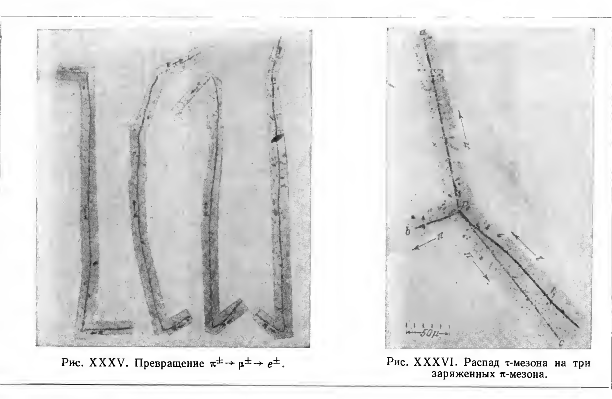


Рис. XXXV. Превращение $\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \rightarrow e^{\pm}$.

Рис. XXXVI. Распад τ-мезона на три заряженных π-мезона.

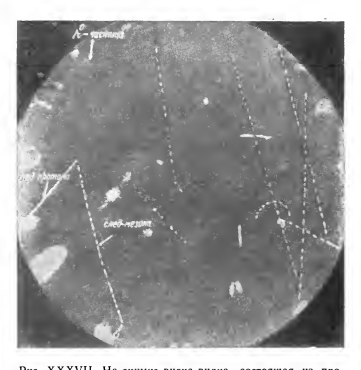


Рис. XXXVII. На снимке видна вилка, состоящая из протона и π-мезона. Вилка образовалась в результате превращения нейтрального гиперона — Λ^0. След нейтрального гиперона на снимке не виден. Его предполагаемый путь указан стрелкой.

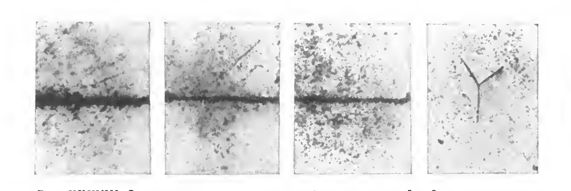


Рис. XXXVIII. Сравнительные снимки следов альфа-частицы, излучённой при распаде тория и космической частицы с большим зарядом. Правый кадр содержит след альфа-частицы (указан стрелкой). Второй кадр справа представляет фотографию следа, оставленного космической частицей при её вступлении в эмульсию. Третий кадр — вид следа той же частицы после прохождения ею слоя эмульсии толщиной 4,5 $г/см^2$. Четвёртый кадр — след той же частицы после прохождения ею слоя вещества толщиной 9,2 $г/см^2$. Чем больший слой проходит частица, тем меньше остаётся у неё энергии и тем больше её ионизирующая способность.

Рис. XXXIX. Ливень частиц, не испытывающих размножения.

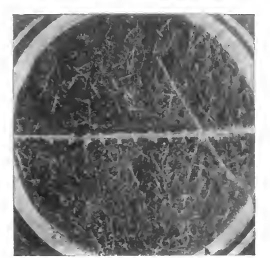


Рис. XL. Деление урана под действием нейтронов. На пластинке, которая перегораживает камеру Вильсона, нанесён тонкий слой окиси урана. Длинные следы — траектории двух осколков, образовавшихся при делении урана. Осколки вылетели в противоположные стороны. Многочисленные короткие следы образовались в результате столкновения нейтронов с атомами водорода, входящими в состав паров, наполняющих камеру.

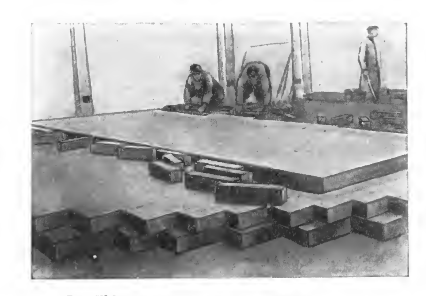


Рис. XLI. Кладка основания первого советского реактора.

Рис. XLII. Кладка активной зоны первого советского реактора.

Рис. XLIII. Взрыв атомной бомбы. Виден огненный шар, внутри которого температура превышает миллион градусов.

Рис. XLIV. Водяной купол, образующийся при подводном взрыве атомной бомбы.

Рис. XLV. «Султан» и первые стадии развития базисной волны, при подводном атомном взрыве.

Рис. XLVI. Радиоавтограф помидорного листа. Отпечаток образовался при наложении листа на фотографическую пластинку. Растение питалось радиофосфором, скопление которого характеризуют светлые места.

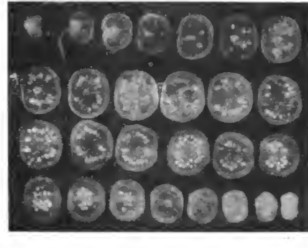


Рис. XLVII. Радиоавтограф срезов помидорного плода, питавшегося радиоактивным хлористым цинком. Видно, что радиоактивный цинк концентрируется в семечках плода.

6 р. 60 к.

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
ТЕХНИКО-ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ
МОСКВА 1956